

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

MÁRCIO AMARAL ALBURQUERQUE

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM
PLANTIO DIRETO**

CURITIBA

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM
PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Solos e Ambiente, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow
Coorientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

CURITIBA

2012



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIA DO SOLO

PARECER

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **MÁRCIO AMARAL ALBURQUERQUE**, sob o título: **"Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em plantio direto"**, requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Concentração: Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de Parecer pela **"APROVAÇÃO"** da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Solo e Ambiente"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 27 de abril de 2012.


Prof. Dr. Jeferson Dieckow, Presidente


Prof. Dr. Cimélio Bayer, I°. Examinador


Engenheira Agrônoma Dra. Josiléia Acordi Zanatta, III°. Examinadora


Prof. Dr. Volnei Pauletti, III°. Examinador

Aos meus Pais Milton e Vilma pela educação, amor, compreensão e apoio incondicional em
todos os momentos da minha vida.
Aos meus irmãos Emerson e Marcelo por todo apoio e carinho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder esta oportunidade e pelo dom da vida.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação pela oportunidade cedida.

Ao Prof. Dr. Jeferson Dieckow pela calorosa acolhida, companheirismo, orientação, incentivo e por compartilhar ensinamentos que muito contribuíram para o meu crescimento profissional e para a realização deste trabalho.

À Fundação ABC para Divulgação e Assistência Técnica Agropecuária, especialmente o Engº Agrº M. Sc. Rudimar Molin, pela cessão da área experimental, pela sua equipe técnica, pela condução do experimento e fornecimento de dados importantes para a realização deste trabalho.

A todos os professores do Programa pela amizade e ensinamentos.

Aos meus amigos e colegas André e Jonatas, pelo companheirismo, incentivo, auxílio na realização dos trabalhos e pelos momentos de descontração.

Aos funcionários dos laboratórios de Biologia do Solo, Física do Solo e Biogeoquímica do Solo, pela ajuda na realização das análises e pela amizade, especialmente a Cleusa.

Ao Gerson, secretário do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, pelos esclarecimentos e auxílios prestados.

Aos estagiários Maico, Ambrósio, Estefano (*in memoriam*), Bruno, Leandro e Anderson pela ajuda, principalmente nos trabalhos de campo.

A todos os colegas da Pós-Graduação pelo convívio e pela parceria, em especial à Caroline, Bruna, Daniel e a Francihele, pelos momentos de descontração, pelas discussões a respeito de solos, pelo companheirismo, incentivo e por tornar este momento mais feliz.

Ao Programa Reuni pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho, o meu muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	viii
GENERAL ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO GERAL	1
LITERATURA CITADA	3
CAPÍTULO 1 - ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO	5
1.1 RESUMO	5
1.2 ABSTRACT	6
1.3 INTRODUÇÃO.....	7
1.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	10
1.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL.....	10
1.4.2 AMOSTRAGEM DE SOLO	12
1.4.3 ESTOQUE E SEQUESTRO/ACÚMULO DE CARBONO E NITROGÊNIO	13
1.4.4 ADIÇÃO DE CARBONO PELAS CULTURAS.....	13
1.5 RESULTADOS	14
1.5.1 DENSIDADE DO SOLO	14
1.5.2 CARBONO, NITROGÊNIO E RELAÇÃO CARBONO/ NITROGÊNIO (C/N).....	15
1.6 DISCUSSÃO	22
1.6.1 CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO	22
1.6.2 RELAÇÃO C/N	27
1.7 CONCLUSÕES	28
1.8 LITERATURA CITADA	28
CAPÍTULO 2 - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO, METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM LATOSSOLO SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL	33
2.1 RESUMO	33

2.2 ABSTRACT	34
2.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	38
2.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL.....	38
2.4.2 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂ , CH ₄ E N ₂ O.....	40
2.4.2.1 PERÍODO E INTERVALOS DE AVALIAÇÃO DAS COLETAS DE AR.....	40
2.4.2.2 COLETAS A CAMPO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE AR	41
2.4.3 PARÂMETROS DO SOLO (DENSIDADE DO SOLO, POROSIDADE, UMIDADE, POROSIDADE PREENCHIDA COM ÁGUA E N INORGÂNICO)	43
2.4.4 CUSTOS DE OPERAÇÕES E INSUMOS AGRÍCOLAS E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (PAG).....	44
2.4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	45
2.5 RESULTADOS	45
2.5.1 EMISSÃO DE N ₂ O	45
2.5.2 EMISSÃO DE CH ₄	48
2.5.3 EMISSÃO DE CO ₂	50
2.5.4 PARÂMETROS DE SOLO.....	54
2.5.5 CARACTERIZAÇÕES METEOROLÓGICAS	61
2.5.6 CUSTO DE OPERAÇÕES E INSUMOS AGRÍCOLAS EM C-CO ₂ -EQ..	62
2.5.7 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (PAG).....	64
2.6 DISCUSSÃO.....	65
2.6.1 EMISSÃO DE N ₂ O	65
2.6.2 EMISSÃO DE CH ₄	68
2.6.3 EMISSÃO DE CO ₂	70
2.6.4 PAG	72
2.7 CONCLUSÕES.....	73
CONCLUSÃO GERAL	80
APÊNDICES	81

ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO ⁽¹⁾

Autor: Engº Agrº Márcio Amaral Albuquerque

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Coorientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

RESUMO GERAL

A agricultura é fonte dos três principais gases do efeito estufa (GEE): CO₂, CH₄ e N₂O. Entretanto, dependendo das práticas de manejo utilizadas, o solo agrícola pode sequestrar carbono (C) e também mitigar as emissões de CH₄ e N₂O. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da adoção de sistemas de rotação de culturas em plantio direto de longo prazo (21 anos) quanto à capacidade de sequestrar C e acumular nitrogênio (N) e avaliar a emissão de N₂O, CH₄ e CO₂, e o potencial de aquecimento global (PAG) dos sistemas de culturas em um Latossolo Vermelho distrófico de Ponta Grossa, PR. No estudo 1 determinou-se o estoque de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo até 100 cm de profundidade, nos seguintes sistemas de culturas: trigo-soja (Tr-So); aveia preta-milho-trigo-soja (Av-Mi-Tr-So); ervilhaca-milho-trigo-soja (Er-Mi-Tr-So); ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So); azevém-milho-avevém-soja (Az-Mi-Az-So) e alfafa-milho (Al-Mi). Os estoques de COT e NT foram calculados considerando a massa equivalente de solo, tendo o sistema Tr-So como referência e que serviu também de linha de base para o cálculo da taxa de sequestro de C e de acúmulo de N. O sistema Al-Mi apresentou os maiores estoques de COT e NT na camada de 0-100 cm (182,6 e 11,1 Mg ha⁻¹ de COT e NT, respectivamente) e as maiores taxas de sequestro de C (0,50 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e acúmulo de N (0,06 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), possivelmente devido a grande produção de raízes, estimulada pelos ciclos de corte e crescimento da parte aérea. Os outros sistemas apresentaram taxas (em Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de: 0,28 (Er-Mi-Tr-So); 0,27 (Az-Mi-Az-So); 0,13 (Er-Mi-Av-So-Tr-So) e 0,06 (Av-Mi-Tr-So). No estudo 2 as avaliações de emissão duraram um ano, iniciando quando os sistemas estavam com soja (exceto o sistema Al-Mi) e perdurando até cerca de três meses após a semeadura do milho (366 dias). O sistema Az-Mi-Az-So teve a maior emissão acumulada de N₂O (4,1 kg N ha⁻¹ ano⁻¹), possivelmente em virtude da menor macroporosidade e maior microporosidade, favorecendo a produção de N₂O. O sistema Al-Mi obteve o maior influxo acumulado de CH₄ (-1,3 kg C ha⁻¹ ano⁻¹), possivelmente devido a maior macroporosidade, que permite uma maior difusão de CH₄ e O₂ para o solo, e maior emissão acumulada de CO₂ (22,3 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹), provavelmente em virtude dos maiores estoques de C e N. O sistema Az-Mi-Az-So apresentou o maior PAG total (892 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) devido à elevada emissão de N₂O e elevados custos enquanto o menor PAG foi verificado pelo sistema Al-Mi (487 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹), em razão da baixa emissão de N₂O e elevado sequestro de C, mesmo tendo apresentado os maiores custos de operações e insumos. Os sistemas Tr-So, Av-Mi-Tr-So e Er-Mi-Tr-So, apresentaram PAG de 677, 770 e 598 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. No entanto, quando avaliada o PAG total dos sistemas com relação ao sistema Tr-So (PAG

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (98 p.) Abril, 2012

relativo), $\text{CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) assim a adoção desses sistemas quando possível, pode se tornar uma estratégia eficiente para reduzir as emissões de GEE pelo setor agrícola.

Palavras chave: Sequestro de C; potencial de aquecimento global; N_2O ; CH_4 .

CARBON AND NITROGEN STOCKS AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN AN OXISOL UNDER NO-TILL CROPPING SYSTEMS ⁽¹⁾

Author: Eng^o Agro^o Márcio Amaral Alburquerque

Advisor: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Co-advisor: Prof. Dr. Cimélio Bayer

GENERAL ABSTRACT

Agriculture is a source for three primary greenhouse gases (GHGs): CO₂, CH₄ e N₂O. Although, depending on the management practices adopted, the agricultural soil can be a sink of CO₂ trough C sequestration and also mitigate the emissions of CH₄ and N₂O. This study aimed to evaluate the long term (21 years) impact of the adoption of no-till cropping systems in the capacity of the soil to sequester C and accumulate N and evaluate the emissions of N₂O, CH₄ e CO₂ and assess the global warming potential (GWP) of the cropping systems in a Oxisol of Ponta Grossa, PR. In the study 1, the C and N stocks were evaluated to a depth of 100 cm in the following systems: W-S (Wheat-Soybean), O-M-W-S (Oat-Maize-Wheat-Soybean), V-M-W-S (Vetch-Maize-Wheat-Soybean), W-M-O-S-W-S (Vetch-Maize-Oat-Soybean-Wheat-Soybean), R-M-R-S (Ryegrass-Maize-Ryegrass-Soybean) and A-M (Alfalfa-Maize). C and N stocks were calculated considering an equivalent mass of soil, having the W-S system as reference and also as a baseline system to calculate the C sequestration and N accumulation. The A-M system obtained the highest C and N stocks in the 0-100 cm layer (182,6 and 11,1 Mg ha⁻¹ of C and N, respectively), and also the highest C sequestration rates (0,50 Mg ha⁻¹ year⁻¹) and N accumulation (0,06 Mg ha⁻¹ year⁻¹), what may be attributed to the high production of roots by alfalfa, stimulated by the several mowing-regrowth cycles. In the study 2, the GHGs fluxes were measured for a year, starting when soybean was implanted (except in the A-M system) and ending approximately three months after the maize sowing (366 days). During this period, the R-M-R-S system had the highest accumulated emission of N₂O (4,1 kg N ha⁻¹), possibly due to the lowest macroporosity and higher microporosity, what probably allowed a greater production of N₂O. The A-M system had the highest accumulated influx of CH₄ (-1,3 kg C ha⁻¹ year⁻¹), possibly due to the highest macroporosity, what probably allowed a greater diffusion of CH₄ and O₂ to soil. This system also showed the highest emission of CO₂ (22,3 Mg C ha⁻¹ year⁻¹), probably due to the higher stocks of C and N. In respect to the GWP, all the systems acted as source of GHGs. The R-M-R-S had the highest total GWP (892 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹) because of the higher emissions of N₂O and high costs, while the lowest total GWP was obtained by the A-M system (487 kg C-CO₂eq ha⁻¹ year⁻¹), due to the low N₂O emissions and higher C sequestration, even having had the highest costs related to operations and inputs. The W-S, O-M-W-S and V-M-W-S systems had a total GWP of 677, 770 e 598 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, respectively. Although, when the total GWP of the systems are compared to the W-S system (relative GWP), the A-M and W-M-W-S presented a mitigation potential (-190 e -79 kg C-CO₂eq ha⁻¹ year⁻¹), thereby the adoption of these systems, when feasible, might be an efficient strategy to reduce the agricultural GHGs emissions.

Keywords: C sequestration; global warming potential; N₂O; CH₄.

¹ Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (98 p.) Abril, 2012.

INTRODUÇÃO GERAL

Desde meados do Século XIX, o aumento da população urbana e da demanda por energia não renovável geram problemas que ameaçam a sustentabilidade do atual modelo de desenvolvimento. O aquecimento global, causado pela intensificação da emissão dos gases do efeito estufa (GEE), é o que pode causar maiores problemas para a humanidade. Segundo dados de 2007 do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), onze dos doze anos compreendidos entre 1995 e 2006 figuraram entre os anos mais quentes da superfície terrestre desde 1850.

Os principais gases do efeito estufa (GEE) são o dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e o metano (CH_4), tendo os dois últimos um potencial de aquecimento de 298 e 25 vezes superiores ao do CO_2 (IPCC, 2001). A concentração destes gases na atmosfera era relativamente estável até o início da Revolução Industrial, quando o uso de combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral, a mudança no uso da terra, a queima de florestas e o preparo intensivo do solo aumentaram a concentração dos mesmos. A concentração do CO_2 na atmosfera passou de 280 ppm para 379 ppm, a de N_2O de 270 ppb para 319 ppb e a de CH_4 de 715 ppb para 1774 ppb (IPCC, 2007).

Globalmente, a agricultura contribui com cerca de 10-12% da emissão antropogênica dos GEE, sendo responsável por 21-25% das emissões de CO_2 , 47% de CH_4 e 58% do N_2O (IPCC, 2007). No Brasil, entretanto, as atividades agrícolas, contribuem com 72% das emissões de CO_2 , 91% das emissões CH_4 e 93% das emissões de N_2O (Cerri et al., 2009). Práticas degradantes dos solos, em detrimento do cultivo, expansão das fronteiras agrícolas, excessivo revolvimento do solo, produtividade animal baixa e extensiva e o uso de fertilizantes nitrogenados são os grandes responsáveis pela maior contribuição da emissão de gases pela agricultura brasileira.

Grande parte das perdas de C do solo na forma de CO_2 deve-se a exposição e fratura dos agregados, pelo efeito do revolvimento do solo, e a baixa adição de C, que pode ser incapaz de manter o estoque de C estável. Já as emissões de N_2O e CH_4 do solo são reguladas por processos microbiológicos, sendo a nitrificação e desnitrificação responsáveis pela produção do N_2O e a metanogênese e metanotrofia pela produção e consumo, respectivamente, do CH_4 (Hutsch, 1998). O processo de nitrificação resume-se à oxidação biológica do íon amônio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) e a desnitrificação a redução do NO_3^- a NO , N_2O ou N_2 (Farquharson & Baldock, 2008), sendo que maiores emissões ocorrem em condições anaeróbicas, quando prevalece a desnitrificação (Gomes, 2006). Quanto ao CH_4 , em condições anaeróbicas as bactérias metanogênicas oxidam compostos orgânicos a CH_4 , enquanto as bactérias metanotróficas, as quais são aeróbicas, utilizam o CH_4 como fonte de energia e carbono (Le Mer & Roger, 2001).

Entretanto, não basta apenas avaliar as emissões diretas de CO_2 , CH_4 e N_2O pelo solo. Em um contexto mais amplo, deve-se estimar o potencial de aquecimento global (PAG) de um sistema de produção agrícola, sendo este o balanço entre o sequestro de C no solo, as emissões de CH_4 e N_2O e os custos das operações e de produção dos insumos agrícolas devido ao consumo de combustíveis fósseis, expressos em C-equivalente (C_{eq}), assim contabilizando também as emissões indiretas de GEE.

A adoção do sistema plantio direto (SPD) pode contribuir na mitigação das mudanças climáticas globais (Cerri, 2007). Segundo Amado et al. (2001), o sistema plantio direto apresenta um grande potencial para mitigar a emissão de CO_2 , uma vez que a rotação de culturas com espécies de alta produção primária líquida, o uso de leguminosas e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo proporcionam uma decomposição gradual do material orgânico, que associado à fração mineral, favorece o aumento do C no solo. No entanto, o uso de adubação nitrogenada e leguminosas em rotação, favorece as emissões de

N_2O devido a maior disponibilidade de nitrogênio no solo. Maiores emissões são observadas quando o teor de NO_3^- e a saturação de água no solo são elevadas (Gomes et al., 2009; Neto et al., 2009). De acordo com o IPCC (2006), de 0,3 a 3% (média de 1 %) do N aplicado na forma de fertilizantes é perdido como N_2O (Houghton et al., 1996), enquanto que em solos cultivados com leguminosas, em levantamento realizado por Eincher (1990) em regiões temperadas, as emissões variam de 0,34 a 4,6 kg ha^{-1} de N_2O .

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a contribuição de sistemas de culturas em plantio direto de longo prazo (21 anos) quanto ao sequestro de carbono, acúmulo de nitrogênio e mitigação da emissão dos gases do efeito estufa. Os objetivos específicos foram: (a) identificar sistemas de culturas capazes de sequestrar C e acumular N nas camadas de 0-20 cm e 0-100 cm; (b) avaliar o efeito de sistemas de culturas em plantio direto, e de variáveis climáticas e de solo, na emissão anual de N_2O , CH_4 e CO_2 e (c) avaliar o PAG e identificar sistemas de culturas capazes de mitigar as emissões líquidas de GEE.

LITERATURA CITADA

- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. R. Bras. Ci. Solo, 25:1 2001.
- CERRI, C.C; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P; FEIGL, B.J. & BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. Sci. Agric. 66: 831-846, 2009.
- CERRI, C.C. & CERRI, C.E.P. Sequestro de carbono em solos na America Latina: Agricultura e aquecimento global. Boletim Informativo SBC, 32:40-44, 2007.
- EINCHER, M.J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data. J. of Environ. Qual., 19:279-280, 1990.
- FARQUHARSON, R. & BALDOCK, J.A. Concepts in modelling N_2O emissions from land use. Plant Soil, 309:147-167, 2008.
- GOMES, J. Emissão de Gases do Efeito Estufa e Mitigação do Potencial de Aquecimento Global por Sistemas Conservacionistas de Manejo do Solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 127p. (Tese de doutorado).

GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F.S.; PICCOLO, M.C.; ZANATTA, J.A.; VIEIRA, C.B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. *Soil Till. Res.*, 106:36-44, 2009.

HOUGHTON, J.T.; MEIRA FILHO, L.G; LIM, B.; TREANTON, K.; MAMATY, I.; BONDUKI, Y.; GRIGGS, D.J. & CALLENDER, B.A. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC/ OECD/IEA: United Kingdom, United King, 1996.

HUTSCH, B.W. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrite and organic manure with respect to soil pH. *Biol. Fert. Soils.*, 28:27-35, 1998.

INTERGOVERNAMENTAL PAINEL OF CLIMATE CHANGE. IPCC, 2001: the scientific basis. In: HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J; DAI, X. & MASKELL, K. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, U.K. and New York, USA. Cambridge University Press, 2001, 881p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE -IPCC. Climate change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability. The Fourth Assessment Report. Cambridge, UK, UNEP, 2007.

INTERNATIONAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.

LER MER, J. & ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.*, 37:25-50, 2001.

NETO, M.S.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B. O, S.P.V.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Jabagi (PR). II – Emissões de CO₂ e N₂O. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1023-1029, 2009.

CAPÍTULO 1 - ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO

1.1 RESUMO

Incrementos no estoque de C e N em solo sob plantio direto dependem do sistema de culturas adotado. Este estudo teve como objetivo identificar sistemas de culturas capazes de sequestrar C e acumular N até 100 cm de profundidade em Latossolo Vermelho do subtrópico brasileiro (Ponta Grossa-PR) manejado sob plantio direto de longa duração (21 anos). O solo foi amostrado em oito camadas, nos seguintes sistemas de culturas: trigo (*Triticum aestivum* L.)-soja (*Glycine max* (L.) Merr) [Tr-So, usado como linha de base], aveia preta (*Avena strigosa* Schreb., para cobertura)-milho (*Zea mays* L.)-trigo-soja [Av-Mi-Tr-So], ervilhaca (*Vicia villosa* Roth, para cobertura)-milho-trigo-soja [Er-Mi-Tr-So], ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja [Er-Mi-Av-So-Tr-So], azevém (*Lolium multiflorum* Lam., para feno)-milho-azevém-soja [Az-Mi-Az-So] e alfafa (*Medicago sativa* L., para feno)-milho [Alf-Mi]. Os estoques de COT e NT foram calculados considerando a massa equivalente de solo, tendo o sistema Tr-So como referência e que serviu também de linha de base para o cálculo da taxa de sequestro de C e de acúmulo de N. Os maiores estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) até 100 cm de profundidade ocorreram no sistema Al-Mi (182,6 Mg ha⁻¹ de COT e 11,1 Mg ha⁻¹ de NT), possivelmente devido a elevada adição de C via raízes (4,74 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) estimulada pelos ciclos de corte e rebrote da alfafa para feno; enquanto os menores estoques ocorreram no sistema Tr-So (172,1 Mg ha⁻¹ de COT e 9,7 Mg ha⁻¹ de NT), devido a baixa adição total de C (5,69 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e de N. A taxa anual de sequestro de C até 1 metro de profundidade, em relação ao Tr-So, aumentou na seguinte ordem (em Mg ha⁻¹ ano⁻¹): Av-Mi-Tr-So (0,06) < Er-Mi-Av-So-Tr-So (0,13) < Az-Mi-Az-So (0,27) < Er-Mi-Tr-So (0,28) < Alf-Mi (0,50). Houve uma correlação positiva ($R^2 = 0,71$) entre adição estimada de C por raízes e estoque de COT na camada de 0-100 cm. Os resultados evidenciam que a adoção de sistemas baseados em leguminosas de inverno para cobertura (ex., ervilhaca) ou para produção de feno (ex., azevém e alfafa) são estratégias eficientes para sequestrar C e acumular N em solo sob plantio direto no subtrópico brasileiro.

Palavras chave: Sequestro de C; acúmulo de N; acúmulo em profundidade; raízes.

CHAPTER 1. CARBON AND NITROGEN STOCK IN AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE CROPPING SYSTEMS

1.2 ABSTRACT

Increments in the C and N stocks of a soil under no-till depend on the cropping system adopted. This objective of this study was to identify cropping systems able to sequester C and accumulate N to a depth of 1 meter in an Oxisol of the Brazilian Southern (Ponta Grossa-PR) under long term no-till (21 years). Soil samples were taken from 8 layers in the following systems: wheat (*Triticum aestivum* L.)-soybean (*Glycine max* (L.) Merr) [W-S, used as the baseline], oat (*Avena strigosa* Schreb., as cover crop)-maize (*Zea mays* L.)-wheat-soybean [O-M-W-S], vetch (*Vicia villosa* Roth., as cover crop)-maize-wheat-soybean [V-M-W-S], vetch-maize-oat-soybean-wheat-soybean (V-M-O-S-W-S), ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam., as forage)-maize-ryegrass-soybean (R-M-R-S) and alfalfa (*Medicago sativa* L., as forage)-maize (A-M). C and N stocks were calculated considering an equivalent mass of soil, having the W-S system as reference and also as a baseline system to calculate the C sequestration and N accumulation. The A-M system obtained the highest C and N stocks till a depth of 1 m (182.6 and 11.1 Mg ha⁻¹ of C e N, respectively) what may be attributed to the high production of roots by alfalfa (4.74 Mg ha⁻¹ year⁻¹), stimulated by the several mowing-re-growth cycles for forage production; while the lowest C and N stocks in the W-S system in the 0-100 cm layer may be attributed to the low C input (5.69 Mg ha⁻¹ year⁻¹) and a great N removal through seed harvesting. The annual C sequestration rate (Mg ha⁻¹ year⁻¹), related to the W-S system increased in the following order: O-M-W-S (0.06) < V-M-O-S-W-S (0.13) < R-M-R-S (0.27) < V-M-W-S (0.28) < A-M (0.50). A positive correlation ($R^2 = 0.71$) was found between the estimated C addition through roots from the crop systems and the C stocks in the 0-100 cm layer. The results show that the adoption of legume based systems for cover (e.g. vetch) or for forage production (e.g. ryegrass and alfalfa) are efficient strategies for C sequestration and N accumulation in soil under no-till in the Brazilian Southern.

Keywords: C sequestration; N accumulation; accumulation at depth; roots.

1.3 INTRODUÇÃO

Desde o final do século XIX a temperatura média da superfície terrestre aumentou 0,8 °C (IPCC, 2007) devido ao aumento nas emissões de CO₂, CH₄ e N₂O oriundos de atividades antrópicas, sendo o CO₂ responsável por 60% deste aumento (Dalal et al., 2008). Entre os setores que mais emitem, destaca-se a agricultura, responsável por 10-12% das emissões globais em CO₂-eq (Smith et al., 2007). No Brasil este setor responde por 19% das emissões, que se somados aquelas causadas pela mudança no uso da terra, resultam em 80% das emissões em CO₂-eq (Brasil, 2010).

Historicamente, a maior parte das emissões de CO₂ pela agricultura e mudança no uso da terra (78 ± 12 Pg de Carbono) originou-se da mineralização da matéria orgânica do solo, devido à conversão de ecossistemas naturais em agrícolas, seguido do manejo inadequado destes solos (Lal, 2004). Isso representa uma quantidade significativa do carbono orgânico total (COT) presente no solo (5%) (1550 Pg até 1 metro (Eswaran et al., 1993)) perdido na forma de CO₂ à atmosfera, cujo reservatório é de 750 Pg de C (Lal et al., 1998).

Devido ao efeito benéfico do carbono, na forma de matéria orgânica, na qualidade do solo (estabilidade de agregados, ciclagem de nutrientes, retenção de água, etc.) e na mitigação do aquecimento global, há interesse em recuperar este carbono perdido. Tecnicamente, o sequestro de CO₂ pode contribuir com 89% do potencial de mitigação dos solos, enquanto o CH₄ e o N₂O apresentam um potencial de 9% e 2%, respectivamente (Smith et al., 2007). Estratégias para sequestrar carbono em agroecossistemas estão bem documentadas (Paustian, 2000; Lal, 2004; Ogle et al., 2005). O sistema de plantio direto (SPD), devido as reduzidas perdas por mineralização e erosão (Sainju et al., 2002), associado com sistemas de culturas diversificados com gramíneas e leguminosas e redução ou anulação do tempo de pousio, destaca-se devido ao elevado potencial de aumentar os teores de COT e de nitrogênio total (NT) no solo (Ogle et al., 2005; Rouw et al., 2010).

O efeito do uso de culturas de cobertura (gramíneas e leguminosas) no COT e NT são atribuídos à elevada adição de resíduos que retornam ao solo, e no caso específico das leguminosas, a fixação biológica de nitrogênio pode favorecer a entrada de C no solo, seja diretamente por resíduos da própria leguminosa, ou indiretamente por estimular o desenvolvimento de gramíneas em rotação ou sucessão (Drinkwater et al., 1998; Franzluebbers et al., 1995). Em trabalhos desenvolvidos na região Sul do Brasil, Sisti et al. (2004), Dieckow et al. (2005) e Amado et al. (2006) encontraram maiores estoques de C e N em sistemas com a inclusão de leguminosas, atribuindo este aumento a maior produção de fitomassa tanto pelo milho em sucessão ou intercalado a leguminosas, como pela própria leguminosa, em comparação a sistemas com gramíneas antecedendo o milho.

No uso de culturas para forragem e em sistemas semi-perenes, o aumento do COT e NT, em comparação a sistemas de culturas anuais, é normalmente atribuído à elevada adição de C e N (principalmente de leguminosas) por raízes, a menor susceptibilidade a erosão e maior tempo em que o solo é vegetado (Paustian et al., 1997; Santos et al., 2011). Campbell et al. (2001) encontraram maiores estoques de C e N em sistemas com a inclusão da alfafa, os quais não foram afetados pela retirada da parte aérea das plantas.

Em uma extensa revisão de 276 comparações em diferentes lugares ao redor do mundo envolvendo sistema convencional, reduzido, mínimo e sistemas de culturas, West & Post (2002), estimaram uma taxa média de sequestro do SPD em comparação ao sistema convencional de $0,48 \pm 0,13 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto que o aumento na complexidade dos sistemas de rotação, resultou em sequestro adicional de $0,20 \pm 0,12 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No Brasil, Bayer et al. (2006) e Bernoux et al. (2006) encontraram resultados semelhantes, com taxas médias de sequestro de 0,48 e 0,68 $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente, na região Sul, enquanto Cerri et al. (2007), estimou uma taxa média de sequestro de C de $0,50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a região Centro-Oeste e Sul do Brasil.

Entretanto, nestes estudos e em 270 das 276 comparações feitas por West & Post (2002) avaliou-se os estoques de carbono até, no máximo, 30 cm de profundidade do solo, provavelmente subestimando o real potencial de sequestro de C e incremento na quantidade de N. Apesar das menores concentrações, as camadas abaixo de 30 cm representam mais da metade do estoque global de C, especialmente em solos de clima tropical e subtropical. Neste ambiente, além dos solos serem mais profundos (maior parte Latossolos), o carbono tende a se alocar proporcionalmente em maiores profundidades, em comparação a regiões de clima mais frio, devido a uma maior sensibilidade da decomposição da matéria orgânica de camadas superficiais, a qual tende a ser mais acelerada (Jobágyi & Jackson, 2000).

Nos últimos anos, têm-se dado um maior enfoque ao acúmulo de C em profundidade. Entre os fatores que mais interferem neste acúmulo, e também no acúmulo de N, em profundidade, destacam-se a biomassa de raiz e exsudados radiculares, migração de matéria orgânica dissolvida e particulada e bioturbação (Jobágyi & Jackson, 2000; Rumpel & Köger-Knabner, 2011).

Comparando-se o efeito de sistemas de manejo quanto à distribuição de C, vários trabalhos tem verificado que no sistema convencional ocorre um maior acúmulo de C em profundidade, principalmente imediatamente a parte inferior da camada arável, enquanto que, no SPD, o acúmulo de C é maior em superfície (Baker et al., 2007). No entanto, outros autores defendem que quando avaliado no longo prazo, o SPD tende a acumular mais C no perfil do solo, devido uma maior produção de matéria seca (Angers & Eriksen-Hamel et al., 2008). Entretanto, Boddey et al. (2010), comparando trabalhos desenvolvidos na região Sul do Brasil, observou que sistemas de culturas manejados sob SPD acumulam mais carbono em profundidade em comparação a sistemas manejados sob preparo convencional, mesmo sem haver diferenças na produção de matéria seca entre os sistemas de manejo, podendo este processo de acúmulo em profundidade ser intensificado quando leguminosas são incluídas nas

rotações de culturas. Sisti et al. (2004), em condições subtropicais, observou que quando a ervilhaca foi adicionada na rotação, o acúmulo de C na camada de 30-100 cm foi muito maior no SPD que no sistema convencional. Provavelmente devido um maior desenvolvimento radicular em profundidade no SPD favorecido pela ervilhaca, resultando em maior estoque de C na camada de 0-100 cm. Esses dados mostram a importância de se avaliar o estoque de C em profundidade, em diferentes condições de uso e também de manejo.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo identificar sistemas de culturas capazes de sequestrar C e acumular N até 100 cm de profundidade em Latossolo do subtrópico brasileiro manejado sob plantio direto de longa duração (21 anos).

1.4 MATERIAL E MÉTODOS

1.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi conduzido em uma área experimental pertencente à Fundação ABC para Assistência e Divulgação Agropecuária, no município de Ponta Grossa (PR) nas coordenadas geográficas de 25°00'42'' S, 50 ° 09'13'' O, com uma altitude de 877 m. O relevo é plano e o clima segundo Köppen é Cfb, com temperaturas médias do mês mais frio de 11 a 12 °C (Julho) e do mês mais quente entre 21-22 °C (Janeiro), e precipitação média anual entre 1700-1800 mm bem distribuídos no decorrer do ano (IAPAR, 1984). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2006) de textura argiloarenosa (450 g kg⁻¹ de argila, 450 g kg⁻¹ de areia e 100 g kg⁻¹ de silte), originada da formação Ponta Grossa do grupo Paraná (Mineropar, 2005).

A vegetação original era de campo nativo, sendo convertido para agricultura por volta de 1960, onde predominou o cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merr) no verão, ambos em sistema convencional até a instalação do experimento no inverno de 1989. O experimento é constituído por 7 sistemas de rotação de

culturas, com 4 blocos ao acaso e parcelas medindo 21 m x 7 m. Para este estudo, os seguintes sistemas foram avaliados:

- (i) Trigo (*Triticum aestivum* L.)-So (*Glycine max* (L.) Merr). Sistema anual voltado apenas para a produção de grãos, sendo o sistema mais simplificado entre os selecionados, bastante utilizado no passado e por isso foi utilizado como referência.
- (ii) Aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.)-Milho (*Zea mays* L.)-Trigo-Soja (Av-Mi-Tr-So). Sistema bianual, com a aveia destinada à cobertura do solo, enquanto o milho, trigo e soja são destinados a produção de grãos. Neste sistema, predominam gramíneas de elevada relação C/N.
- (iii) Ervilhaca (*Vicia villosa* Roth)-Milho-Trigo-Soja (Er-Mi-Tr-So). Sistema bianual, mas diferencia-se do anterior (Aveia-Milho-Trigo-Soja) por apresentar uma leguminosa (ervilhaca) como cobertura do solo antecedendo o milho.
- (iv) Ervilhaca-Milho-Aveia-Soja-Trigo-Soja (Er-Mi-Av-So-Tr-So). Sistema tri-anual de maior complexidade de culturas, com aveia e ervilhaca para cobertura do solo no inverno, e soja e milho no verão, com maior frequência da soja.
- (v) Azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)-Milho-Azevém-Soja (Az-Mi-Az-So). Sistema bianual onde se integra a produção de grãos (milho e soja) com produção de forragem animal (azevém), o qual sofre em média, três cortes por ciclo com o uso de roçadeira, sendo a parte aérea retirada da área. No entanto, entre o último corte e a dessecação com glifosato, para implantação da cultura de verão, espera-se de 15-30 dias para que haja a formação de quantidade de parte aérea suficiente para a cobertura do solo.
- (vi) Alfafa (*Medicago sativa* L.)-Milho (Al-Mi). Sistema também de integração entre produção de grãos e forragem animal. A alfafa apresenta característica semi-

perene, permanecendo na área por dois anos e meio, sendo interrompida para a produção do milho por uma safra. A parte aérea da alfafa é retirada de 7-9 vezes por ano, por ocasião do florescimento. Este sistema, assim como o anterior, não é comum no Brasil, mas representa uma condição comum da região, onde há grande quantidade de gado confinado alimentado com forragem.

A adubação nitrogenada no milho foi a mesma para todos os sistemas, independente da rotação e da cultura antecessora, utilizando-se 36 kg de N ha⁻¹ na operação de semeadura e em média 180 kg de N ha⁻¹ em aplicação única de cobertura.

1.4.2 AMOSTRAGEM DE SOLO

A amostragem de solo ocorreu em outubro de 2010, em dois pontos de coleta por parcela, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm. Até 30 cm de profundidade, as camadas de solo foram amostradas com o auxílio de uma espátula, através da abertura de uma trincheira com dimensões laterais de 25 x 50 cm, delimitadas por um gabarito de metal ancorado na superfície do solo. Chapas de metal foram utilizadas para delimitar exatamente a profundidade de 5, 10, 20 e 30 cm e para garantir que as paredes laterais da trincheira permanecessem no prumo e que o fundo permanecesse nivelado. O solo retirado de cada camada foi pesado no campo e uma sub-amostra foi usada para a determinação da umidade gravimétrica. Como o volume e a massa de solo de cada camada amostrada eram conhecidos, foi possível calcular a densidade do solo, com base nos princípios do método de escavação para a determinação da densidade (Blake & Hartge, 1986).

As camadas entre 30 e 100 cm de profundidade foram amostradas com umtrado-cavador (rosca), com diâmetro de 21 cm, a partir do fundo da trincheira aberta para a amostragem das camadas superiores. Foram realizadas duas perfurações de amostragem por trincheira e a profundidade de escavação foi rigorosamente controlada a partir do gabarito de

metal ancorado na superfície. Da mesma forma, o solo de cada camada foi pesado e com base no volume conhecido foi determinada a densidade pelo método da escavação.

Para a determinação do carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), as amostras foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm, moídas em gral até passar em peneira de 0,25 mm. O COT e NT foram determinados através de combustão seca, em analisador elementar Vario EL III.

1.4.3 ESTOQUE E SEQUESTRO/ACÚMULO DE CARBONO E NITROGÊNIO

O estoque de COT e NT foi calculado levando-se em consideração massas iguais de solo entre os tratamentos, utilizando-se como referência o sistema Tr-So (correção por massa equivalente). Isto foi feito para corrigir as diferenças de densidade apresentadas entre os sistemas. Para isto, utilizou-se a equação apresentada por Sisti et al. (2004).

Para calcular a taxa de sequestro anual de C e acúmulo de N, utilizou-se como referência o sistema Tr-So, em que a diferença no estoque de C e N dos sistemas com o sistema Tr-So foi dividida pelo período de duração do experimento em anos (21).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey a 10%.

1.4.4 ADIÇÃO DE CARBONO PELAS CULTURAS

Para fins de correlação entre a adição de carbono pelas culturas (raiz e parte aérea) e o estoque de C no solo dos sistemas de culturas, utilizou-se dados estimados de adição de carbono obtidos do trabalho de Santos et al. (2011).

1.5 RESULTADOS

1.5.1 DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo ao longo do perfil seguiu tendência semelhante em todos os sistemas de culturas, aumentando a partir da superfície até a camada de 10-20 cm e diminuindo desta até 30-45 cm, a partir da qual se manteve constante até 100 cm (Figura 1.1).

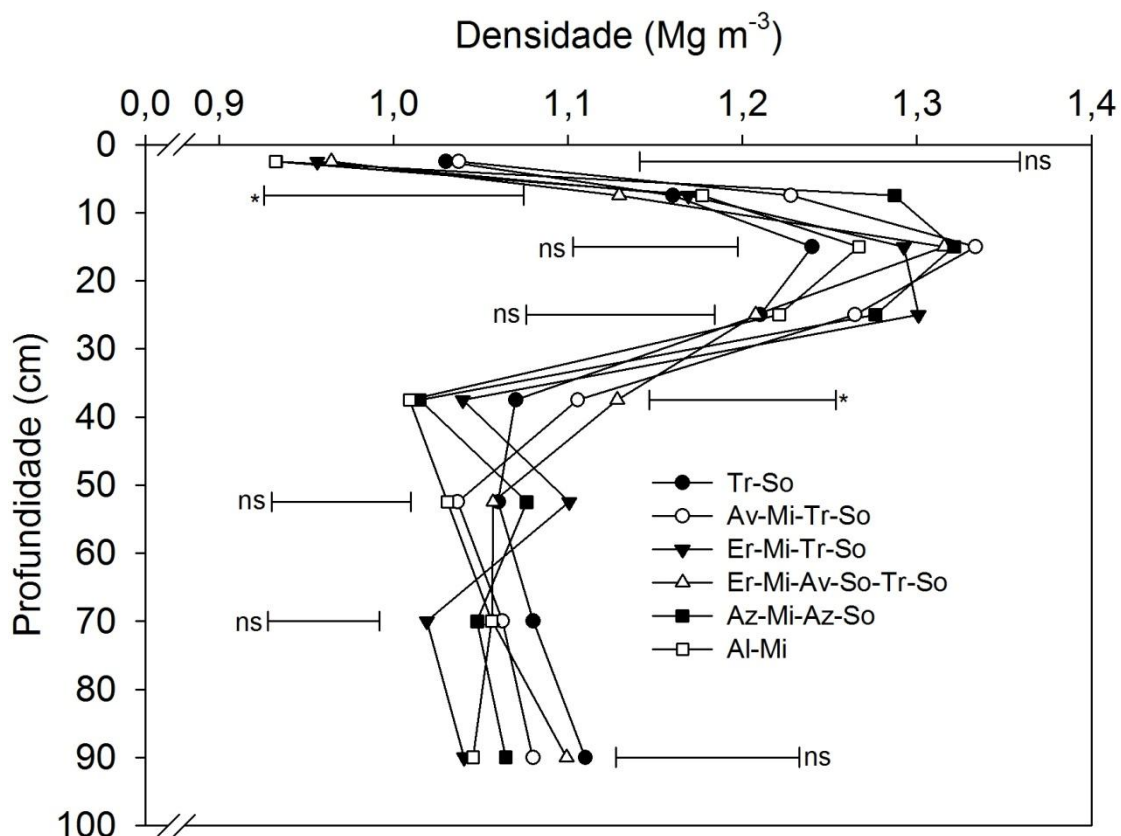


FIGURA 1.1. Densidade de um Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em plantio direto. Ponta Grossa – PR. Barras horizontais representam o DMS entre sistemas para a mesma camada pelo teste de Tukey a 10% de significância. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

A densidade do solo não diferiu significativamente entre os sistemas de culturas, para a maioria das camadas. Entretanto na camada de 5-10 cm, a densidade foi 14% maior no sistema Az-Mi-Az-Só ($1,28 \text{ Mg m}^{-3}$) em relação ao sistema Er-Mi-Av-Só-Tr-Só ($1,13 \text{ Mg m}^{-3}$). Na camada de 30-45 cm, o sistema Er-Mi-Av-Só-Tr-Só apresentou a maior densidade ($1,12 \text{ Mg m}^{-3}$) e os sistemas forrageiros Az-Mi-Az-Só ($1,00 \text{ Mg m}^{-3}$) e Al-Mi ($1,01 \text{ Mg m}^{-3}$) as menores.

1.5.2 CARBONO, NITROGÊNIO E RELAÇÃO CARBONO/ NITROGÊNIO (C/N)

Estratificações nas concentrações de COT e NT foram observadas ao longo do perfil do solo (Tabela 1.1). A concentração de COT variou em média de 35,9 g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm a 10,1 g kg⁻¹ na camada de 80-100 cm. Para NT, essa variação média foi de 2,80 a 0,50 g kg⁻¹, para as camadas de 0-5 e 80-100 cm, respectivamente (Tabela 1.1). Numa tendência inversa, a relação C/N aumentou em profundidade, variando de uma média de 12,8 na camada de 0-5 cm a 20,8 na camada de 80-100 cm.

As concentrações de COT e NT foram afetadas pelos sistemas de culturas (Tabela 1.1). O sistema semi-perene Al-Mi apresentou maior concentração de COT na camada de 0-5 cm (38,8 g kg⁻¹), enquanto o sistema Er-Mi-Tr-So a menor (33,5 g kg⁻¹). Na camada de 5-10 cm os sistemas forrageiros Al-Mi e Az-Mi-Az-So continham as maiores concentrações de COT, com uma média de 27,6 g kg⁻¹, sendo quase 10% superior que a média dos outros sistemas. Na camada de 30-45 cm o sistema Tr-So apresentou a menor concentração (14,5 g kg⁻¹). Nas demais camadas a concentração de COT foi similar entre os tratamentos. Para as concentrações de NT, o sistema Al-Mi apresentou os maiores valores em quase todas as camadas exceto em 30-45, 45-60 e 80-100 cm. Nestas, o sistema Er-Mi-Tr-So continha as maiores concentrações de NT. Na camada de 60-80 cm, ambos os sistemas Al-Mi e Er-Mi-Tr-So apresentaram os maiores teores de NT, com uma média de 0,61 g kg⁻¹.

TABELA 1.1. Concentração de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e relação carbono / nitrogênio (C/N) em Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em plantio direto. Ponta Grossa-PR.

Camada	Tr-So ⁽¹⁾		Av-Mi-Tr-So		Er-Mi-Tr-So		Er-Mi-Av-So-Tr-So		Az-Mi-Az-So		Al-Mi	
cm	COT (g kg ⁻¹)											
0-5	35,0	b ⁽²⁾	35,9	ab	33,8	b	35,9	ab	36,2	ab	38,8	a
5-10	24,8	b	25,3	ab	25,3	ab	25,8	ab	27,7	a	27,6	a
10-20	21,2	a	20,4	a	21,1	a	21,2	a	21,6	a	22,8	a
20-30	19,3	a	18,3	a	19,5	a	18,9	a	18,2	a	19,9	a
30-45	14,5	b	15,4	a	16,0	a	15,4	a	15,8	a	16,1	a
45-60	13,2	ab	13,0	b	13,8	a	13,2	ab	13,0	ab	13,6	ab
60-80	10,9	a	11,2	a	11,7	a	11,2	a	11,4	a	11,6	a
80-100	10,0	a	9,7	a	10,3	a	10,1	a	10,3	a	10,4	a
	NT (g kg ⁻¹)											
0-5	2,58	c	2,76	bc	2,63	c	2,94	ab	2,75	bc	3,19	a
5-10	1,78	b	1,73	b	1,79	b	1,92	ab	1,94	ab	2,08	a
10-20	1,29	a	1,32	a	1,35	a	1,33	a	1,26	a	1,46	a
20-30	1,09	ab	1,11	ab	1,11	ab	1,12	ab	1,01	b	1,18	a
30-45	0,81	c	0,88	abc	0,93	a	0,91	ab	0,82	bc	0,90	abc
45-60	0,66	b	0,71	ab	0,75	a	0,73	ab	0,76	a	0,73	ab
60-80	0,52	c	0,58	ab	0,55	bc	0,61	a	0,50	c	0,61	a
80-100	0,45	cd	0,46	cd	0,57	a	0,49	bc	0,44	d	0,52	b
	C/N											
0-5	13,5	a	13,0	abc	12,9	abc	12,2	bc	13,1	ab	12,1	c
5-10	13,9	ab	14,7	a	14,1	ab	13,4	b	14,2	ab	13,2	b
10-20	16,3	ab	15,5	b	15,5	b	15,9	ab	17,2	a	15,5	b
20-30	17,7	a	16,5	a	17,5	a	16,9	a	17,9	a	16,9	a
30-45	17,9	ab	17,4	b	17,1	b	17,0	b	19,2	a	17,9	ab
45-60	19,8	a	18,3	ab	18,5	ab	17,9	b	17,0	b	18,4	ab
60-80	20,8	bc	19,3	cd	21,3	ab	18,3	d	22,6	a	19,0	d
80-100	22,2	ab	21,0	bc	18,0	d	20,5	c	23,2	a	20,0	c

(1) So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

(2) Valores seguidos pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,10).

Sistemas de culturas afetaram significativamente os estoques de COT e NT (Figura 1.2). O sistema Al-Mi apresentou maiores estoques de COT e NT, tanto nas camadas de 0-20 cm (63,5 e 4,6 Mg ha⁻¹ de COT e NT, respectivamente), como na de 0-100 cm (182,6 e 11,1 Mg ha⁻¹ de COT e NT, respectivamente), obtendo um incremento no estoque de COT e NT na camada de 0-20 cm de 4,80 Mg ha⁻¹ de COT (8%) e 0,6 Mg ha⁻¹ de NT (13 %) com relação ao sistema Tr-So. Para a camada de 0-100 cm, um acúmulo de 10,46 e 1,38 Mg ha⁻¹ de COT e

NT (6 e 14%) respectivamente, pelo sistema Al-Mi foi observado, comparado ao sistema Tr-So.

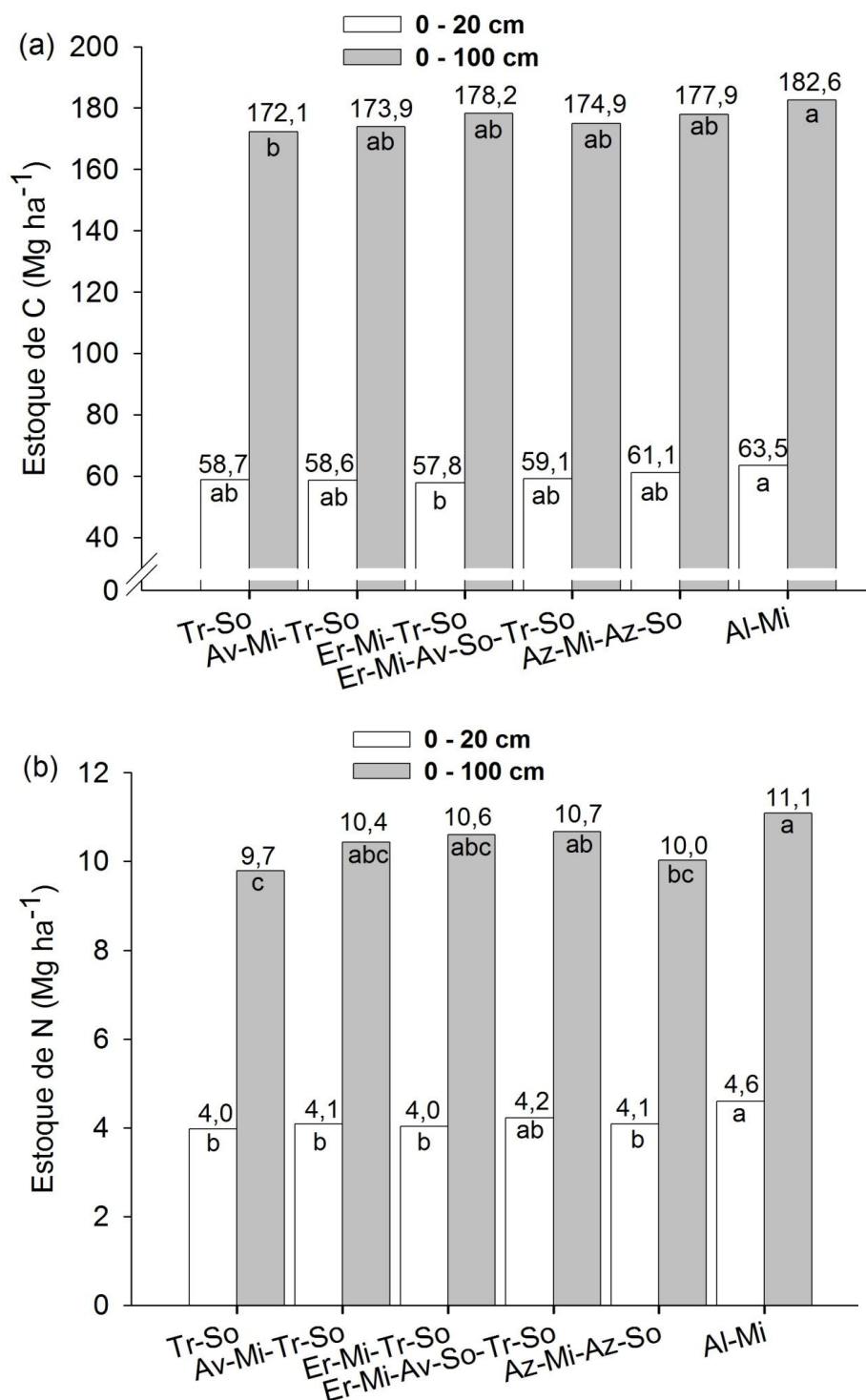


FIGURA 1.2. Estoques de carbono orgânico total (a) e nitrogênio total (b) nas camadas de 0-20 e 0-100 cm. Barras com a mesma letra, para a mesma camada, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 10% de significância. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

Utilizando-se a sucessão Tr-So como linha de base no cálculo da taxa de sequestro de C (Figura 1.3a), na camada de 0-20 cm, o sistema Al-Mi sequestrou mais C ($0,22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), havendo perda relativa nos sistemas Er-Mi-Tr-So ($-0,04 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e Av-Mi-Tr-So ($-0,01 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Quando considerada a camada de 20-100 cm, todos os sistemas de rotação apresentaram sequestro de C em relação à sucessão Tr-So, sendo que o sistema Er-Mi-Tr-So foi o que mais sequestrou C, com $0,33 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em comparação aos sistemas Av-Mi-Tr-So, Er-Mi-Tr-So e Az-Mi-Az-So, que obtiveram média de sequestro de $0,11 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C. Considerando a camada de 0-100 cm, novamente todos os sistemas apresentaram sequestro de C em relação ao sistema Tr-So, principalmente o sistema Al-Mi ($0,50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), com destaque também para os sistemas Er-Mi-Tr-So ($0,28 \text{ Mg ha}^{-1}$) e Az-Mi-Az-So ($0,27 \text{ Mg ha}^{-1}$). Em média, 76 % do sequestro de C neste experimento ocorreu na camada de 20-100 cm, sendo que os sistemas forrageiros Az-Mi-Az-So e Al-Mi apresentaram, proporcionalmente, as menores taxas de sequestro de C para esta camada, de 58 e 54%, respectivamente.

Em relação ao acúmulo de N (Figura 1.3b) todos os sistemas apresentaram maiores valores que a sucessão Tr-So, independente da camada avaliada. Para a camada de 0-20 cm, o sistema Al-Mi acumulou mais N ($0,03 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), sendo este valor 7 vezes superior a média de acúmulo de N dos sistemas Av-Mi-Tr-So, Er-Mi-Tr-So e Az-Mi-Az-So ($0,004 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Para a camada de 20-100, os sistemas com ervilhaca (Er-Mi-Tr-So e Er-Mi-Av-So-Tr-So) e o sistema Al-Mi acumularam mais N, com uma média de $0,03 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Na camada de 0-100 cm o sistema Al-Mi foi o que mais acumulou N ($0,06 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), em razão das elevadas taxas de acúmulo tanto na camada de 0-20 cm como na de 20-100 cm. O sistema Az-Mi-Az-So apresentou menores taxas de acúmulo de N em todas as camadas.

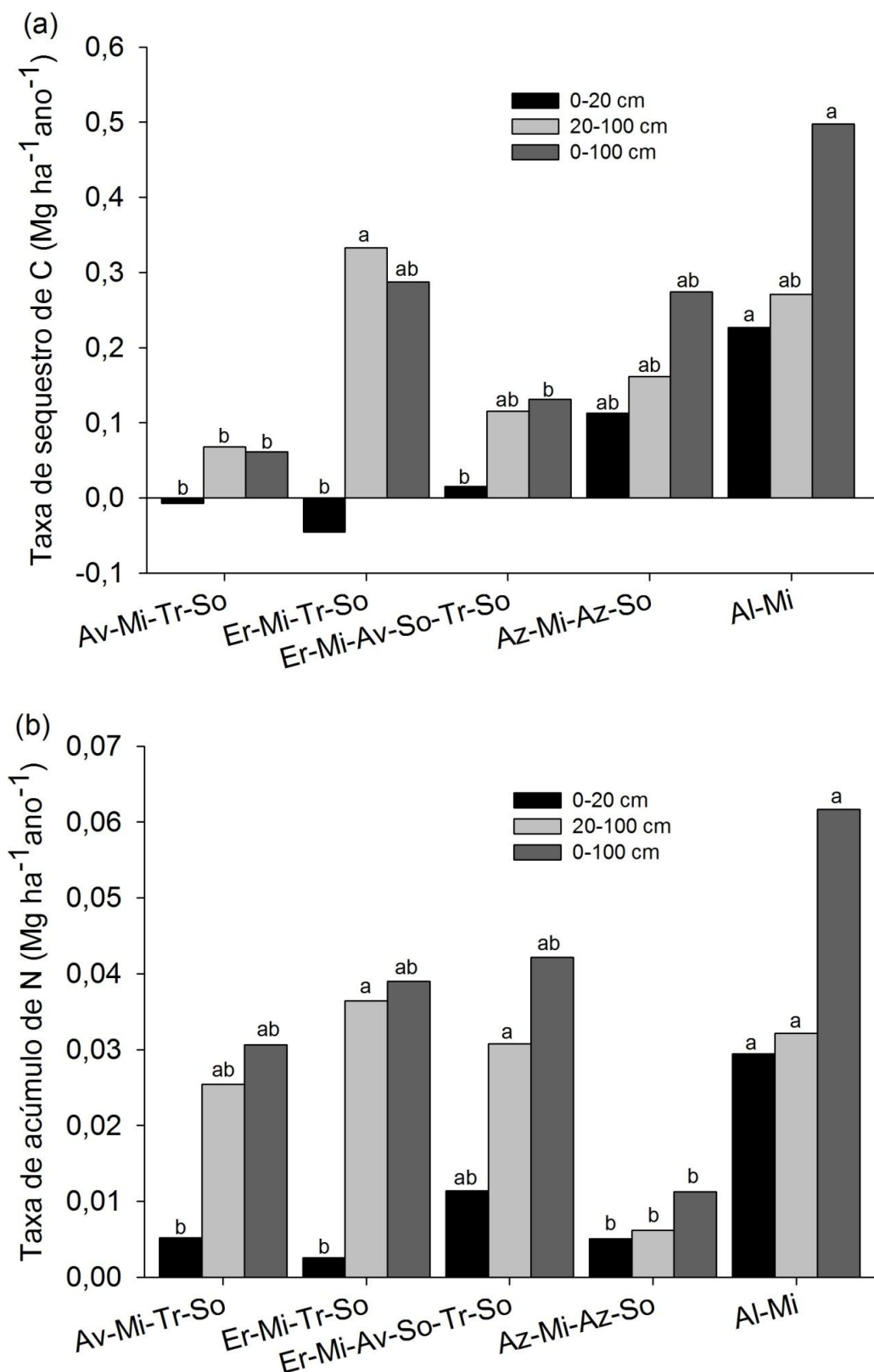


FIGURA 1.3. Taxas de sequestro de carbono (a) e acúmulo de nitrogênio (b) nas camadas de 0-20, 20-100 e 0-100 cm. Barras com a mesma letra no topo, na mesma camada, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 10% de significância. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

Relacionando a adição de carbono total pelos sistemas de culturas (parte aérea mais raiz, obtidos no trabalho de Santos et al., 2011) com o estoque de COT em 0-100 cm, não foi verificada correlação significativa (Figura 1.4a). Também não foi observada correlação entre adição de C por parte aérea e estoque de COT (Figura 1.4b). Contudo, ao se relacionar somente a adição por raízes, observa-se uma relação significativa, a qual é melhorada quando retirado o sistema Er-Mi-Tr-So, aumentando o R^2 de 0,71 para 0,95 (Figura 1.4c).

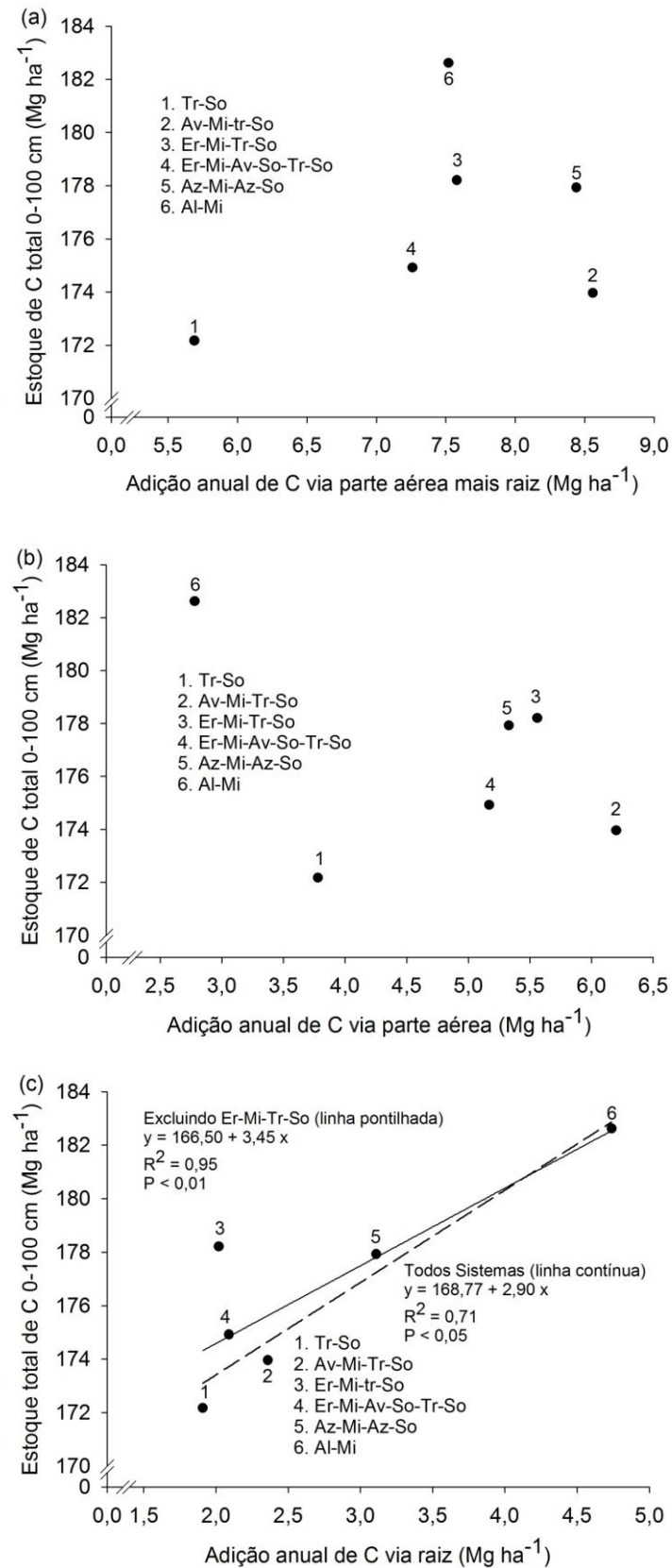


FIGURA 1.4. Relação entre estoque de carbono orgânico total (COT) em 0-100 cm com a adição total de C pelos sistemas de culturas (a), adição de C somente por parte aérea (b) e adição de C somente por raiz (c). So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

1.6 DISCUSSÃO

1.6.1 CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO

As maiores concentrações e estoques de COT e de NT no sistema Al-Mi na camada de 0-20 cm (Tabela 1.1 e Figura 1.2) podem ser atribuídas principalmente aos ciclos de crescimento, corte e rebrote da parte aérea da alfafa (6 a 7 por ano). Isso leva a ciclos de senescência e reestabelecimento de raízes finas, caracterizados por fluxos positivos de carbono para a rizosfera (Richards, 1993). Além disso, estas raízes são mais propensas a proteção física dentro de microagregados (Rasse et al., 2005), contribuindo para o aumento no estoque de COT desta camada. Maior estoque de COT e de NT também foi verificado neste sistema na camada de 0-100 cm, o que pode ser atribuído ao sistema radicular profundo da alfafa (Lal et al., 1997) e a sua extensa rede de raízes que continuam a se expandir com o tempo e que ao senescerem, aumentam significativamente o estoque de C (Zhang et al., 2009). Os maiores estoques de N deste sistema devem ser atribuídos a capacidade de fixação simbiótica de N pela alfafa, e pela grande quantidade de N presente em suas raízes como demonstrado por Rasse et al. (1999).

O efeito da inclusão de culturas forrageiras no estoque de carbono e nitrogênio (principalmente leguminosas) é bem conhecido (Lal et al., 1997; Paustian et al., 1997). Yang & Kay (2001) e Russel et al. (2005) mensuraram maiores estoques de COT e Campbell et al. (2001) estimaram maiores acúmulos de C e de N em sistemas com a inclusão de alfafa. O que normalmente é atribuído ao maior tempo de uso do solo, elevada adição de carbono via raízes, formação de agregados estáveis, maior ciclagem de nutrientes pelas plantas, menor revolvimento e a redução nas taxas de decomposição da matéria orgânica em razão da diminuição da umidade do solo devido ao maior uso da água pelas plantas no decorrer do ano (Paustian et al., 2000; Ogle et al., 2005; Bolinder et al., 2010; Rouw et al., 2010).

Estes fatores, juntamente com a elevada capacidade de fixação simbiótica de N, provavelmente contribuíram para que o sistema Al-Mi obtivesse os maiores estoques de COT

e de NT e as maiores taxas de sequestro de C, de 0,22 e 0,50 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, e de acúmulo de N, de 0,03 e 0,06 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, para as camadas de 0-20 e 0-100 cm, respectivamente (Figuras 1.3a e 1.3b, respectivamente). Para a camada de 20-100 cm, as maiores taxas de acúmulo de N estão associadas à alternância de espécies em relação ao sistema Tr-So e a presença de leguminosas em rotação para cobertura e produção de forragem, visto que os sistemas Er-Mi-Tr-So, Er-Mi-Av-So-Tr-So e Al-Mi obtiveram as maiores taxas.

O menor estoque de COT no sistema Tr-So na camada de 0-100 cm (Figura 1.2a) é devida a baixa adição total de C via fitomassa por este sistema. Studdert & Echeverria (2000), na Argentina, também observaram menores estoques de COT em sistemas exclusivos de soja no verão em razão da baixa adição de C. Outro fator que pode explicar o menor estoque de COT e também de NT do sistema Tr-So (Figuras 1.2a e 1.2b, respectivamente) é a grande exportação de N do campo pelos grãos da soja, a qual pode ser maior àquela fixada biologicamente (Peoples et al., 1995; Alves et al., 2002), o que contribui para uma menor produção de matéria seca.

A taxa relativamente alta de sequestro de C na camada de 0-100 cm apresentada pelo sistema bianual Az-Mi-Az-So (0,27 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) (Figura 1.3a) podem ser atribuída aos ciclos de corte e retirada da parte aérea do azevém, seguidos de adubação nitrogenada, o que provavelmente estimulou o crescimento da parte aérea e consequentemente de novas raízes (Richards, 1993), assim como ocorreu no sistema Al-Mi. Enquanto que as menores taxas de acúmulo de N verificadas, provavelmente estão associadas à ausência de leguminosas e a exportação de N pela retirada da parte aérea do azevém.

Uma elevada taxa de sequestro de C também foi encontrada na camada de 0-100 cm no sistema Er-Mi-Tr-So (0,28 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) (Figura 1.3a), o que deve-se a adição de uma leguminosa antecedendo o milho. Bayer et al. (2000) verificaram um maior estoque de COT no sistema aveia preta + ervilhaca/milho em comparação ao sistema aveia preta/milho, o que

foi atribuído a maior quantidade de matéria seca produzida pelo milho em sucessão a leguminosa, o que também foi verificado em outros trabalhos (Amado et al., 2001; Sisti et al., 2004; Dieckow et al., 2005). No entanto, neste estudo, comparando-se ao sistema Av-Mi-Tr-So, de acordo com o trabalho de Santos et al. (2011), houve uma menor adição de carbono ao solo pelo sistema com leguminosa ($7,56 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), ao passo que no sistema com aveia preta houve uma adição de $8,56 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Entretanto, observando-se as taxas de sequestro de 0-20 cm e 20-100 cm, verificou-se que o sistema Er-Mi-Tr-So apresentou a maior taxa de sequestro de COT em 20-100 cm e a menor na camada de 0-20 cm (Figura 1.3a) o que pode ser devido a uma maior migração de matéria orgânica dissolvida (MOD) para camadas mais profundas no solo sob Er-Mi-Tr-So, a qual pode estar se estabilizando através da sorção com óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Kalbitz & Kaiser, 2008). Provavelmente, a produção de MOD no sistema Er-Mi-Tr-So foi potencializada pela maior entrada de N devido à baixa relação C/N da ervilhaca e facilidade de decomposição de seus resíduos, seguido de adubação mineral nitrogenada do milho não diferenciada entre os sistemas. Nestas condições, na camada de 0-20 cm, os microorganismos do solo têm elevada disponibilidade de N e insuficiente disponibilidade de C lábil, o que desencadeia a busca de formas mais humificadas de C como fonte de energia (Kuzyakov et al., 2000; 2002), com consequente origem de MOD (Kalbitz et al., 2000).

Além destes fatores, uma maior formação de MOD por exsudados radiculares de leguminosas (Chantigny, 2003) e um maior acúmulo de C em profundidade por sistemas com ervilhaca, como mostrado por Sisti et al. (2004), devem estar contribuindo neste processo. Jobbágy & Jackson (2000) e Wright (2007) apontaram o carbono orgânico dissolvido (COD) como um dos principais responsáveis pelo acúmulo de C em subsuperfície, acumulando em camadas que as raízes não podem chegar. Estes fatores justificam o desvio do sistema Er-Mi-

Tr-So da tendência dos demais sistemas (Figura 1.4c). E também devem estar contribuindo para os maiores teores de N nas camadas abaixo de 30 cm (Tabela 1.1).

Em trabalhos desenvolvidos na região Sul do Brasil em SPD, Bayer et al. (2000), Amado et al. (2001), Sá et al. (2001), Bayer et al. (2003), Dieckow et al. (2005) e Amado et al. (2006), mensuraram taxas de sequestro anual de C para a camada de 0-20 cm (com exceção de Dieckow et al. (2005) que considerou até 17,5 cm) entre 0,12 e 2,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, com uma média de 0,93 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, o que em geral é aumentada quando se compara taxas de sequestro até 100 cm. Dieckow et al. (2005) para a camada até 107,5 cm encontrou um valor médio de 1,42 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para sistemas com leguminosas e adubação nitrogenada. Uma revisão recente de Franzluebbers (2010) estimou a taxa média de sequestro nos Estados Unidos da América em sistemas com culturas de cobertura de 0,55 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para a camada de 0-20 cm. Estes valores são superiores ao encontrado neste trabalho para os sistemas com culturas de cobertura na camada de 0-20 cm, que foi em média de - 0,03 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Contudo se considerada a camada de 0-100 cm, a taxa média de sequestro é de 0,15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, passando então a atuar como dreno de CO₂ atmosférico. No entanto, se considerado apenas os sistemas para a produção de feno, a taxa média de sequestro nas camadas de 0-20 e 0-100 cm é de 0,16 e 0,38 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, mostrando um maior potencial de sequestro na utilização de sistemas com culturas destinadas a produção de forragem, o que pode ser atribuído aos frequentes ciclos de morte e reestabelecimento de raízes, como explicado anteriormente. Quando considerada a camada de 20-100 cm de todos os sistemas, observa-se que houve um incremento médio de 320% no sequestro de C (0,16 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) com relação a camada de 0-20 cm (0,05 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), mostrando a elevada capacidade de sistemas de culturas de sequestrar C em camadas mais profundas.

As menores taxas de sequestro de C encontrados neste experimento, em relação aos experimentos supracitados e a revisão de Franzluebbers (2010), são principalmente devido

aos sistemas de referência utilizados no cálculo da taxa de sequestro de C nestes estudos, os quais em sua maioria são áreas manejadas convencionalmente, ou em alguns casos, áreas nativas. As taxas de sequestro de carbono têm sido apontadas por vários autores como uma característica intrínseca do local estudado. Sua comparação, mesmo em condições climáticas parecidas é de difícil realização, uma vez que além do sistema de referência adotado, há diferenças no histórico, no tempo de implantação do SPD, nas classes de solo, na textura, nos sistemas de culturas, na quantidade de plantas daninhas, na aplicação de fertilizantes e ainda nos diferentes métodos de determinação do C, de amostragem e de cálculo dos estoques (Neto et al., 2009; Franzluebbers, 2010).

Os teores e estoques de COT dos solos são governados pelo balanço entre entrada de C via resíduos e pela perda de C, principalmente por mineralização. Então, duas maneiras lógicas de se aumentar o estoque seriam aumentar as entradas de C e/ou reduzir as taxas de mineralização da matéria orgânica (Paustian et al., 2000). Balesdent & Balabane (1996) trabalhando com solos cultivados com milho concluíram que as raízes contribuem mais com o acúmulo de carbono no solo do que a parte aérea. Este efeito foi atribuído principalmente a baixa taxa de decomposição das raízes comparada com a parte aérea, o que também é afirmado por Rasse et al. (2005). Assim, plantas com elevada quantidade de raízes podem ser mais eficientes em sequestrar carbono. Isso foi verificado neste estudo, em que encontrou-se uma correlação linear positiva ($R^2 = 0,71$) entre adição de C por raízes e estoque de COT na camada de 0-100 cm (Figura 1.4c), com o sistema Al-Mi apresentando a maior produção de raiz ($4,74 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e maior estoque de COT, e o sistema Tr-So a menor adição de raiz ($1,91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e menor estoque de COT. Outros estudos também tem verificado que o incremento no estoque de COT foi significativamente correlacionado à adição de matéria orgânica por raízes e não com a parte aérea (Norby et al., 2004; Russel et al., 2004, 2007).

Rasse et al. (2005) apontou cinco principais mecanismos de estabilização do C do solo que são favorecidos pelas raízes: (1) elevada recalcitrância química; (2) maior proteção físico-química pela interação mais íntima com minerais do solo; (3) maior proteção física das raízes a decomposição microbiana pela maior agregação; (4) proteção por íons metálicos e (5) menor decomposição em camadas mais profundas. Juntos, estes fatores devem estar sendo determinantes na relação entre estoque de COT e adição de C por raízes.

1.6.2 RELAÇÃO C/N

O aumento da relação C/N em profundidade (Tabela 1.1) provavelmente é decorrente da presença de carvão vegetal resultante de queimadas ocorridas no passado. A elevada relação C/N e resistência a decomposição do carvão decorre de sua estrutura aromática condensada (Shrestha et al, 2010) e proteção física em agregados (Brodowski et al., 2006), assim acumulando-se no solo (Trumbore & Czimczik, 2008). Rumpel et al. (2009) também observou que o carvão vegetal migra facilmente pelo solo, acumulando-se em camadas mais profundas, podendo este processo de transporte ser potencializado por bioturbação (Boulet et al., 1995). Dieckow et al. (2005) também verificaram evidências de carvão a 40 cm em solo subtropical do Rio Grande do Sul. Assim, para este solo, conforme o declínio dos teores de carbono com a profundidade, maior a proporção do carvão com relação à matéria orgânica do solo, aumentando a relação C/N.

Em geral, menores valores de relação C/N foram encontrados em sistemas com leguminosas, principalmente devido à entrada adicional de N pela fixação biológica de nitrogênio. Enquanto que nos sistemas Az-Mi-Az-So e Tr-So, as maiores relações C/N mensuradas, devem-se, em geral, aos menores valores de NT no solo. Isto pode ser atribuído em ambos os sistemas a exportação de N do campo, pela retirada da parte aérea do azevém no sistema Az-Mi-Az-So e pela exportação de N pelos grãos da soja, principalmente no sistema Tr-So, como discutido anteriormente.

1.7 CONCLUSÕES

O uso de sistemas de rotação de culturas, especialmente o semi-perene Al-Mi, é eficiente em sequestrar C e acumular N no solo, em relação ao sistema anual Tr-So, em plantio direto.

Sistemas de rotação com inclusão de leguminosas para cobertura do solo e produção de forragem (Er-Mi-Tr-So, Er-Mi-Av-So-Tr-So e Al-Mi) são mais eficientes em acumular N no longo prazo, principalmente em subsuperfície.

Mais da metade do C sequestrado nos sistemas analisados ocorre na camada de 20-100 cm, evidenciando a importância de camadas profundas do solo em servirem como dreno de C em sistemas de culturas sob plantio direto no Subtropical brasileiro.

Evidências sugerem existir uma relação estreita entre adição de fitomassa via raízes e sequestro de C, provavelmente devido a maior estabilidade proporcionado ao C adicionado via raízes no perfil do solo.

1.8 LITERATURA CITADA

- ALVES, B.; ZOTARELLI, L.; LARA-CABEZAS, W.; TORRES, E.; HUNGRIA, M.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R. Benefit of Legume-Fixed N in Crop Rotations Under Zero-Tillage. *Curr. Plant. Sci. Biot.*, 38:533-534, 2002.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B.C. & VEIGA, M. Potential of Carbon Accumulation in No-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.*, 35:1599-1607, 2006.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:189-197, 2001.
- ANGERS, D.A. & ERIKSEN-HAMEL, N.S. Full-Inversion Tillage and Organic Carbon Distribution in Soil Profiles: A Meta-Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:1370-1374, 2008.
- BAKER, J.M.; OCHSNER, T.E.; VENTEREA, R.T. & GRIFFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know ? *Agric. Ecosyst. Environ.*, 118:1–5, 2007.
- BALESDENT, J. & BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biol. Biochem.*, 28:261–1263, 1996.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Till. Res.*, 86:237–245, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54:101-109, 2000.

BAYER, C.; SPAGNOLLO, E.; WILDNER, L. P.; ERNANI, P.R. & ALBURQUEQUE, J.A. Incremento de carbono e nitrogênio num Latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. *Cienc. Rural*, 33:469-475, 2003.

BERNOUX, M.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; SIQUEIRA NETO, M.; METAY, A.; PERRIN, A.S.; SCOPEL, E.; BLAVET, D.; PICCOLO, M.C.; PAVEI, M. & MILNE, E. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 26:1-8, 2006.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Ed. Madison. 2 ed. Madison, WI, 1986 p. 363- 382.

BODDEY, R.M.; CLAUDIA P. JANTALIA, C.P.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J. SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; ALVES, B.J.R. & URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biol.*, 16:784–795, 2010.

BOLINDER, M.A.; KÄTTERER, T.; ANDRÉN, O.; ERICSON, L.; PARENT, L.E. & KIRCHMANN, H. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics in forage-based crop rotations in Northern Sweden (63–64). *Agric. Ecosyst. Environ.*, 138:335–342, 2010.

BOULET, R.; PESSENDA, L.C.R.; TELLES, E.C.C. & MELFI, A.J. Evaluation of the rate of surface biological accumulation of soil matter using radiocarbon dating on charcoal and soil humin fraction. A case study of oxisols from the basin of the "Lagoa Campestre" Central Brazil. *C.R. Acad. Sci. Paris*. 320:287-294, 1995.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. Sumário de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases do efeito estufa, 2010.

BRODOWSKI, S.; B. JOHN, B.; FLESSA, H. & AMELUNG, W. Aggregate-occluded black carbon in soil. *Eur. J. Soil Sci.*, 57:539–546, 2006.

CAMPBELL, C. A.; SELLES, F.; LAFOND, G. P. & ZENTNER, R. P. Adopting zero tillage management: Impact on soil C and N under long-term crop rotations in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil. Sci.*, 81:139–148, 2001.

CERRI, C. E.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M. & CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Sci. Agric.* 64:83-99, 2007.

CHANTIGNY, M. H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*, 113:357-380, 2003.

DALAL, R. C & ALLEN, D. E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Aust. J. Bot.*, 56:369–407, 2008.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 year. *Soil Till. Res.*, 81:87-95, 2005.

DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KOGL-KNABNER, I. Composition of organic matter in a subtropical Acrisol as influenced by land use, cropping and N fertilization, assessed by CPMAS ^{13}C NMR spectroscopy. *Eur J Soil Sci* 56:705-715, 2005.

DRINKWATER, L. E., WAGONER, P. & SARRANTONIO, M. Legume based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 396:262-264, 1998.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro (Embrapa Solos), p. 212, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. 2 ed. Rio de Janeiro (Embrapa Solos), p. 306, 2006.

ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E. & REICH, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:192–194, 1993.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M. & ZUBERER, D.A. Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1618-1624, 1995.

FRANZLUEBBERS, A.J. Achieving Soil Organic Carbon Sequestration with Conservation Agricultural Systems in the Southeastern United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:347–357, 2010.

IAPAR. Cartas Climáticas do Estado do Paraná 1984. IAPAR, Londrina, p. 49, 1984.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE -IPCC. Climate change 2 Climate change impacts, adaptation and vulnerability. The Fourth Assessment Report. Cambridge, UK, UNEP, 2007.

JOBÁGGY, E.G. & JACKSON, R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.*, 10:423–436, 2000.

KALBITZ, K. & AND KAISER, K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 171:52–60, 2008.

KALBITZ, K.; SOLINGER, S.; PARK, J.H.; MICHALZIK, B. & MATZNER, E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Sci.*, 165:277-304, 2000.

KUZYAKOV, Y. Review: factors affecting rhizosphere priming effects. *J. Plant. Nutr. Soil Sc.*, 165:382–396, 2002.

KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J.K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. Biochem.*, 32:1485-1498, 2000.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123:1-22, 2004.

LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F. & STEWART, B.A. Soil Processes and Carbon Cycle. (Eds.) CRC Press, Boca Raton, FL, 1998, 457 p.

LAL, R.; HENDERLONG, P.; FLOWERS, M. Forages and row cropping effects on soils organic carbon and nitrogen contents. In: Lal, R.; kimble, J. M.; Follet, R. F.; Stewart, B. A. Management of carbon sequestration in soil. CRC – Press, 1.ed. Boca Raton, FL, 1997. p. 381-389.

- NETO, M. S.; FILHO, S. P. V.; PICCOLO, M. C. P.; CERRI, C. E. P. & CERRI, C.C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I Sequestro de carbono no solo. R. Bras. Ci. Solo, 33:1013-1022, 2009.
- MINEROPAR. Mapa Geológico do Estado do Paraná . Mineropar - Minerais do Paraná, Secretaria de Estado da Indústria, do Comércio e Assuntos do Mercosul, Curitiba, 2001.
- NORBY, R.J.; LEDFORD, J.; REILLY, C.D.; MILLER, N.E. & O'NEILL, E.G. Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO₂ enrichment. P Natl. Acad. Sci. USA., 101:9689-9693, 2004.
- OGLE, S. M.; BREIDT, F.J. & PAUSTIAN, K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. Biogeochemistry, 72: 87–121, 2005.
- PAUSTIAN, K.; COLLINS, H.P. & PAUL, E.A. Management controls on soil carbon. In: PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T.; COLE, C.V. Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems: Long-term Experiments in North America. CRC Press, Boca Raton, FL, 1997, p. 15-49.
- PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E. T. & HUNT, H. W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. Biogeochemistry 48:147–163, 2000.
- PEOPLES, M. B.; GAULT, R. R.; LEAN, B.; SYKES, J. D. & BROCKWELL, J. Nitrogen fixation by soybean in commercial irrigated crops of Central and Southern New South W Soil Biol. Biochem., 27:553-561, 1995.
- RASSE, D. P.; RUMPEL, C. & DIGNAC, M. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. Plant Soil, 269:341-356, 2005.
- RASSE, D.P.; SMUCKER, A.J.M. & SCHABENBERGER, O. Modifications of soil nitrogen pools in response to alfalfa root systems and shoot mulch. Agron. J. Volume: 91:471-477, 1999.
- RICHARDS, J. H. Physiology of plants recovering from defoliation. Proceedings of the XVII International Grassland Congress, 85-94, 1993.
- ROUW, A.; HUON, S.; SOULILEUTH, B.; JOUQUET, P.; PIERRET, A.; RIBOLZI, O.; VALENTIN, C.; BOURDON, E. & CHANTHARATH, B. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos). Agric. Ecosyst. Environ., 136:148–161, 2010.
- RUMPEL C.; DARBOUX, F.; CHAPLOT, V. & PLANCHON, O. Erosion budget of pyrogenic carbon at meter scale and process selectivity. Geoderma, 154:131–137, 2009.
- RUMPEL, C. & KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. Plant Soil, 338:143–158, 2011.
- RUSSEL, A. E.; CAMBARDELLA, C. A. C.; EWEL, J. J. E. & PARKIN, T. B. Species, rotation, and life-form diversity effects on soil carbon in experimental tropical ecosystems. Ecol. Appl., 14:47-60, 2004.

RUSSELL, A. E.; LAIRD, D. A.; PARKIN, T.B. & MALLARINO, A. P. Impact of Nitrogen Fertilization and Cropping System on Carbon Sequestration in Midwestern Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:413–422, 2005.

RUSSELL, A.E.; RAICH, J.W.; VALVERDE-BARRANTES, O.J. & FISHER, R.F. Tree species effects on soil properties in experimental plantations in tropical moist forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:1389–1397, 2007.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C. & FEIGL, B.J. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1486–1499, 2001.

SAINJU, U.M.; SINGH, B.P.; WHITEHEAD, W.F. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. *Soil Till. Res.*, 63:167–179, 2002.

SANTOS, N. Z.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V. & PIVA, J. T. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil Till. Res.*, 111: 208–218, 2011.

SHRESTHA, G.; TRAINA, S. J. & SWANSTON, C. W. Black Carbon's Properties and Role in the Environment: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2:294–320, 2010.

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 76:39–58, 2004.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; MCCA... B.; OGLE, S.; O'MARA, F. RICE, C.; SCHOLLES, B. & SIROTENKO, 2007: Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. p. 497–540.

STUDDERT, G.A. & ECHEVERRÍA, H. E. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1496–1503, 2000.

TRUMBORE, S. & CZIMCZIK, C. I. An Uncertain Future for Soil Carbon. *Science*. 321:1455–1456, 2008.

WEST, T.O. & POST, W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:1930–1946, 2002.

WRIGHT, A.L.; DOU, F. & HONS, F.M. Crop species and tillage effects on carbon sequestration in subsurface soil. *Soil Science*, 172:124–131, 2007.

YANG, X. M. & KAY, B. D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario. *Soil & Till. Res.*, 59:107–114, 2001.

ZHANG, T.; WANG, Y.; WANG, X.; WANG, Q.; HAN, J. Organic carbon and nitrogen stocks in reed meadow soils converted to alfalfa fields. *Soil. Till. Res.*, 105:143–148, 2009.

CAPÍTULO 2 - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO, METANO E DIÓXIDO DE CARBONO EM LATOSSOLO SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL

2.1 RESUMO

Sistemas de culturas alteram a dinâmica de emissão dos gases do efeito estufa (GEE) pelo solo, podendo mitigar o aquecimento global. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de longo prazo (21 anos) da adoção de sistemas de rotação de culturas em plantio direto, na emissão anual de N_2O , CH_4 e CO_2 , e no PAG (potencial de aquecimento global) de um Latossolo no Sul do Brasil e identificar variáveis meteorológicas e de solo que controlam as emissões dos GEE. O estudo foi conduzido em experimento de campo (Ponta Grossa-PR), em cinco sistemas de culturas sob plantio direto: trigo (*Triticum aestivum* L.)-soja (*Glycine max* (L.) Merr) [Tr-So, usado como linha de base], aveia preta (*Avena strigosa* Schreb., para cobertura)-milho (*Zea mays* L.)-trigo-soja [Av-Mi-Tr-So], ervilhaca (*Vicia villosa* Roth, para cobertura)-milho-trigo-soja [Er-Mi-Tr-So], ervilhaca-milho-aveia preta-soja-trigo-soja [Er-Mi-Av-So-Tr-So], azevém (*Lolium multiflorum* Lam., para feno)-milho-avevém-soja [Az-Mi-Az-So] e alfafa (*Medicago sativa* L., para feno)-milho [Alf-Mi]. O PAG total baseou-se na emissão anual acumulada de N_2O e CH_4 , nos custos de operações e insumos, e no balanço de C no solo com relação ao sistema Tr-So enquanto o PAG parcial baseou-se na diferença do PAG total dos sistemas com relação ao sistema Tr-So. As avaliações de emissão duraram um ano, iniciando quando os sistemas estavam com soja (exceto o sistema Al-Mi) e perduraram até cerca de três meses após a semeadura do milho (366 dias). Em ordem decrescente a emissão acumulada de N_2O (em $kg\ N-N_2O\ ha^{-1}$) comportou-se da seguinte forma: Az-Mi-Az-So (4,1) > Er-Mi-Tr-So (3,4) > Av-Mi-Tr-So (3,0) > Al-Mi (2,3) > Tr-So (2,1). A maior emissão no sistema Az-Mi-Az-So foi possivelmente em virtude da menor macroporosidade e maior microporosidade, favorecendo a produção de N_2O . O sistema Al-Mi obteve o maior influxo de C- CH_4 ($-1,3\ kg\ ha^{-1}$), possivelmente devida a maior macroporosidade, que permite uma maior difusão de CH_4 e O_2 para o solo, e também a maior emissão de CO_2 ($22,3\ Mg\ C-CO_2\ ha^{-1}$), possivelmente devido os maiores estoques de C e N. Com relação ao PAG total, todos os sistemas no período avaliado agiram como fonte de GEE, em $kg\ C-CO_2-eq\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, comportando-se da seguinte forma: Al-Mi (486,6) < Er-Mi-Tr-So (598,1) < Tr-So (677,1) < Av-Mi-Tr-So (770,1) < Az-Mi-Az-So (892,1). O maior PAG total apresentado pelo sistema Az-Mi-Az-So deve-se a elevada emissão de N_2O e aos elevados custos, enquanto o menor PAG total obtido pelo sistema Al-Mi foi em razão da baixa emissão de N_2O e elevado sequestro de C, mesmo tendo apresentado elevados custos de operações e insumos. No entanto quando avaliada o PAG relativo os sistemas Al-Mi e Er-Mi-Tr-So apresentaram potencial de mitigação (-190 e $-79\ Kg\ C-CO_2eq\ ha^{-1}\ ano^{-1}$). Desse modo a adoção desses sistemas quando possível, pode se tornar uma estratégia eficiente para reduzir as emissões de GEE pelo setor agrícola.

Palavras chave: N_2O ; CH_4 ; CO_2 , potencial de aquecimento global.

CHAPTER 2. FLUXES OF GREENHOUSE GASES AND MITIGATION OF THE GLOBAL WARMING POTENTIAL IN AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE CROPPING SYSTEMS IN SOUTHERN BRAZIL

2.2 ABSTRACT

Cropping systems alter the dynamics of emission of greenhouse gases (GHGs) by soil, and may have potential for mitigating global warming. This study aimed to evaluate the long term effect (21 years) of the adoption of cropping systems under no-tillage, in the emissions of N_2O , CH_4 and CO_2 , and also evaluate its partial GWP (global warming potential) in an Oxisol of Southern Brazil and identify possible soil and meteorological variables that control the emissions of the GHGs. A field experiment (Ponta Grossa, PR) was carried out with five cropping systems: wheat (*Triticum aestivum* L.)-soybean (*Glycine max* (L.) Merr) [W-S, used as the baseline], oat (*Avena strigosa* Schreb., as cover crop)-maize (*Zea mays* L.)-wheat-soybean [O-M-W-S], vetch (*Vicia villosa* Roth., as cover crop)-maize-wheat-soybean [V-M-W-S], ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam., as forage)-maize-ryegrass-soybean (R-M-R-S) and alfalfa (*Medicago sativa* L., as forage)-maize (A-M). The calculation of the total GWP was based on the cumulative annual emissions of N_2O and CH_4 and the costs of operations and inputs, and the C balance in the soil while the partial GWP was based in the difference of the total GWP compared to the W-S system. The GHGs fluxes were measured for a year, starting when soybean was implanted (except in the A-M system) and ending approximately three months after the maize sowing (366 days). In a decreasing order, the accumulated emissions of N_2O ($kg\ N-N_2O\ ha^{-1}\ year^{-1}$) can be placed in the following order: R-M-R-S (4,1) > V-M-W-S (3,4) > O-M-W-S (3,0) > A-M (2,3) > W-S (2,1). The larger emission in the R-M-R-S system was possibly due to the lower macroporosity and higher microporosity, favoring the production of N_2O . The A-M system had the highest accumulated influx of CH_4 ($-1,3\ kg\ C\ ha^{-1}\ year^{-1}$), possibly due to the highest macroporosity, what probably allowed a greater diffusion of CH_4 and O_2 to soil. This system also showed the highest accumulated emission of CO_2 ($22,3\ Mg\ C\ ha^{-1}\ year^{-1}$), probably due to higher C and N stocks. In respect to the total GWP, all systems acted as source of GHGs, in $kg\ C-CO_2\ eq\ ha^{-1}\ year^{-1}$, in the following order: A-M (486,6) < V-M-W-S (598,1) < W-S (677,1) < O-M-W-S (770,1) < R-M-R-S (892,1). The R-M-R-S had the highest GWP because of the higher emissions of N_2O and high costs, while the lowest GWP was obtained by the A-M system ($486,6\ kg\ C-CO_2\ eq\ ha^{-1}\ year^{-1}$), due to the low N_2O emissions and higher C sequestration, even having had the highest costs related to operations and inputs. Although, when evaluated the partial GWP, the A-M and W-M-W-S presented a mitigation potential ($-190\ e\ -79\ kg\ C-CO_2\ eq\ ha^{-1}\ year^{-1}$), thereby the adoption of these systems, when feasible, might be an efficient strategy to reduce the agricultural GHGs emissions.

Keywords: N_2O , CH_4 , CO_2 , global warming potential.

2.3 INTRODUÇÃO

A agricultura é um dos principais responsáveis pela emissão dos gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera, onde o solo tem um papel fundamental, podendo atuar tanto como fonte ou dreno de CO_2 , CH_4 e N_2O , dependendo das práticas de manejo empregadas. Globalmente, a agricultura, no ano de 2005, respondeu por uma emissão de 5,1 a 6,1 $\text{GtCO}_2\text{-eq ano}^{-1}$ no ano de 2005 (10 – 12% do total de emissões antropogênicas dos GEE) e está aumentando a taxas de 60 $\text{MtCO}_2\text{-eq ano}^{-1}$ (Smith et al., 2007). No Brasil este setor responde por 19%, que se somadas as emissões causadas pela mudança no uso da terra, resultam em 80% das emissões em $\text{CO}_2\text{-eq}$ do país (Brasil, 2010). Assim, em um mundo de população crescente, identificar práticas de manejo agrícola capazes de mitigar as emissões dos GEE torna-se crucial na mitigação das mudanças climáticas, principalmente no Brasil, por deter uma das maiores áreas agrícolas do planeta.

Entre as práticas promissoras, o sistema de plantio direto, com o uso de culturas de cobertura (leguminosas e gramíneas) e culturas destinadas a produção de forragem têm mostrado potencial de sequestro de C (Dieckow et al., 2005; Sainju et al., 2008; Santos et al., 2011), e sua adoção está crescendo substancialmente no Sul do Brasil (Mielniczuk et al., 2003). No Brasil, existem aproximadamente 27 milhões de hectares em plantio direto (Boddey et al., 2011) o que representa aproximadamente 57% dos 47 milhões de hectares destinado a produção de grãos no Brasil na safra 2005/2006 (CONAB, 2012). No entanto, o efeito na emissão dos GEE, e principalmente o balanço entre o sequestro de C e emissão em $\text{C-CO}_2\text{eq}$ de N_2O e CH_4 mais os custos relativos a insumos e práticas agrícolas de sistemas de culturas em plantio direto na formação do Potencial de Aquecimento Global (PAG) restringe-se a poucos estudos (Robertson et al., 2000; Flessa et al., 2002; Gomes et al., 2006; Mosier et al., 2006; Adviento-Borbe et al., 2007; Ceschia et al., 2010) situando-se predominantemente em países de clima temperado.

Enquanto a capacidade de sequestro de C pelos solos é finita (Six et al., 2002), as emissões de CO₂, N₂O e CH₄ sempre ocorrerão, uma vez que são oriundos, principalmente, da atividade biológica natural dos solos. Entretanto, alterações na disponibilidade de nutrientes e no ambiente em que vivem estes microorganismos podem ou não favorecer a emissão desses gases e são grandemente afetados pelas práticas de manejo (Gregorich et al., 2006). Sistemas de culturas com leguminosas e adubação nitrogenada em gramíneas elevam as quantidades de N no solo (NH₄⁺ e NO₃⁻) causando a liberação de N₂O pelos processos de nitrificação e desnitrificação (Farquharson & Baldock, 2008), podendo diminuir a oxidação do CH₄ pela competição do NH₄⁺ pela enzima mono-oxigenase (Bodelier et al., 2004) e até aumentar as emissões de CO₂ (Amos et al., 2005). A emissão de CO₂ pode ainda ser afetada pela quantidade e qualidade dos resíduos, devido ao efeito na velocidade de decomposição, pela produção de biomassa subterrânea, devida a respiração de raízes e rizosférica, e pela atividade da micro e macro fauna (Hanson et al., 2000). A emissão de CH₄ e N₂O pode ainda ser aumentada devida a adição de resíduos, principalmente os de baixa relação C/N, em função do baixo suprimento de O₂, devido ao seu rápido consumo pela atividade decompositora, o que estimula os processos de metanogênese e desnitrificação, responsáveis pela produção do CH₄ e do N₂O, respectivamente (Topp & Pattey, 1997; Chantigny et al., 2002). No entanto, a magnitude destes processos depende diretamente dos parâmetros meteorológicos (temperatura do ar e precipitação) e de atributos físicos do solo (temperatura, umidade e porosidade), por interferirem principalmente na difusão de O₂ e na disponibilidade dos substratos aos processos de produção dos GEE (Smith et al., 2003).

Baggs et al. (2003) em sistema de preparo convencional, na Inglaterra, mediram uma maior emissão acumulada de N₂O nos 65 dias após a incorporação de resíduos de fava (*Vicia faba*) em comparação a resíduos de azevém (*Lolium multiflorum*). No Sul do Brasil, Gomes et al. (2009) em plantio direto, verificaram maior emissão acumulada anual de N₂O em sistemas

com leguminosas tropicais. Em ambos estudos, a baixa relação C/N das leguminosas foi o principal fator que elevou as emissões de N_2O . Outros autores têm reportado efeitos similares de resíduos de culturas na emissão de N_2O (Baggs et al., 2000; Millar & Baggs et al., 2005).

Quanto ao CH_4 , o efeito da aplicação de fertilizantes nitrogenados e resíduos com elevado teor de N na diminuição da oxidação do CH_4 é controverso, com estudos apontando uma diminuição da oxidação (Jang et al., 2006) e outros não (Hutsch et al., 1993; Dobbie & Smith, 1996). Por outro lado, é certo que alterações na estrutura do solo, como a as provocadas pela compactação, tem um efeito pronunciado na redução da oxidação do metano pela diminuição da drenagem e difusão dos gases pelo solo (Ball et al., 1999), sendo este o principal fator a interferir na emissão acumulada de CH_4 em solos aerados.

Em relação ao CO_2 , Franzluebbers et al. (1995) mensuraram uma emissão anual acumulada variando de 5,85 a 8,42 $Mg\ ha^{-1}$ no Texas, USA, encontrando correlação entre emissão média de CO_2 e entrada de C em sistemas de culturas. No Sul do Brasil, Campos et al. (2011) verificaram uma emissão anual acumulada de CO_2 entre 8,93 a 9,47 $Mg\ ha^{-1}$, não obtendo diferença entre os sistemas de manejo do solo e de culturas. Em ambos os trabalhos, as emissões comportaram-se de forma sazonal, mostrando dois picos principais de emissão de CO_2 : na fase de maior desenvolvimento das culturas, devida a respiração das raízes, e após a colheita, devido a decomposição aeróbia dos resíduos (parte aérea e raízes) pelos microorganismos heterotróficos. Diversos estudos tem também verificado uma forte influência da temperatura sobre as emissões de CO_2 (Parkin & Kaspar, 2003; Jabro et al., 2008), sendo obtidos maiores valores com temperaturas mais altas.

Quando considerado o PAG, Adviento-Borbe et al. (2007), nos EUA, mostraram que tanto os sistemas de monocultura do milho quanto de sucessão Soja-Milho, agiram como fonte de GEE, com os sistemas Milho-Milho e Soja-Milho contribuindo com uma média de 690 e 1.020 $kg\ C-CO_2eq\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, respectivamente, sendo a menor emissão pelo sistemas de

monocultura do milho atribuído ao maior sequestro de C nestes sistemas, mesmo apresentando maiores emissões de N_2O e maiores custos relacionados a utilização de fertilizantes nitrogenados. Já Robertson et al. (2000), avaliando diferentes sistemas de culturas em plantio direto em comparação ao sistema convencional, concluíram que sistemas perenes de Alfafa e Álamo (*Populus* sp.) tiveram PAG de -200 e -1050 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, principalmente em razão do maior sequestro de C, enquanto os sistemas em plantio direto com rotação Milho-Trigo-Soja, apresentaram um PAG positivo, com uma média de 400 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, porém menores que o sistema de preparo convencional do solo (1.140 kg C-CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹), em razão, principalmente, do sequestro de C.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de longo prazo (21 anos) da adoção de sistemas de rotação de culturas em plantio direto, na emissão anual de N_2O , CH_4 e CO_2 , e no PAG de um Latossolo no Sul do Brasil, e identificar possíveis variáveis meteorológicas e de solo que controlem as emissões dos GEE.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi baseado em um experimento de longa duração (21 anos) conduzido na área experimental da Fundação ABC, no município de Ponta Grossa, Paraná (25°00'42'' S, 50° 09'13'' O, altitude de 877 m). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argiloarenosa (450 g kg⁻¹ de areia, 150 g kg⁻¹ de silte e 400 g kg⁻¹ de argila), originado da Formação Ponta Grossa do grupo Paraná (Mineropar, 2001). Alguns atributos químicos dos tratamentos no vigésimo primeiro ano do experimento estão apresentados na Tabela 2.1. Mais detalhes encontram-se no capítulo anterior ou em Molin (2008).

TABELA 2.1 Atributos químicos, do mês de outubro do vigésimo primeiro ano do experimento, na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de culturas em plantio direto.

Sistema ⁽¹⁾	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC ef.	V%
	(água)	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹						
Tr-So	6,1	27,2	0,5	5,0	2,0	0,0	5,0	12,5	60,0
Av-Mi-Tr-So	6,1	17,3	0,5	4,5	1,9	0,0	7,8	14,7	46,9
Er-Mi-Tr-So	6,0	29,8	0,5	4,6	2,0	0,0	5,0	12,1	58,8
Az-Mi-Az-So	5,8	30,7	0,3	3,9	1,8	0,0	5,8	11,8	50,9
Al-Mi	5,7	79,0	0,7	4,2	1,0	0,1	5,7	11,7	50,3

(1) So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

O experimento foi instalado no inverno de 1989 e é constituído por 7 tratamentos, com

4 blocos ao acaso e parcelas de 21 m x 7 m, para este estudo, os seguintes foram avaliados:

- (i) Trigo-Soja (Tr-So). Sistema anual voltado apenas para a produção de grãos, sendo o sistema mais simplificado entre os selecionados, bastante utilizado no passado e por isso será utilizado como referência.
- (ii) Aveia (*Avena strigosa* Schreb.)-Milho (*Zea mays* L.)-Trigo-Soja (Av-Mi-Tr-So). Sistema bianual, com a aveia destinada a cobertura do solo, enquanto o milho, trigo e soja são destinados a produção de grãos.
- (iii) Ervilhaca (*Vicia villosa* Roth)-Milho-Trigo-Soja (Er-Mi-Tr-So). Sistema bianual, mas diferencia-se do anterior (Aveia-Milho-Trigo-Soja) por apresentar uma leguminosa (ervilhaca) antecedendo o milho.
- (iv) Azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)-Milho-Azevém-Soja (Az-Mi-Az-So). Sistema bianual onde se integra a produção de grãos (milho e soja) com produção de forragem (azevém), o qual sofre em média, três cortes por ciclo com o uso de roçadeira, sendo a parte aérea retirada da área.
- (v) Alfafa (*Medicago sativa* L.)-Milho (Al-Mi). Sistema também de integração entre produção de grãos e forragem. A alfafa apresenta característica semi-perene, permanecendo na área por dois anos e meio, sendo interrompida apenas para a produção do milho. A parte aérea da alfafa é retirada de 7-9 vezes por ano, por ocasião do florescimento. Este sistema, assim como o anterior, não é comum no

Brasil, mas representam uma condição comum da região, onde há grande quantidade de gado confinado alimentado com forragem.

A adubação foi realizada de acordo com a necessidade de cada cultura, independente do sistema. Para o milho, trigo e azevém utilizaram-se 36, 28 e 35 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia no sulco de semeadura, respectivamente, e 135 e 112 kg ha⁻¹ de N no milho e trigo, respectivamente, em aplicação única de cobertura. No azevém, a aplicação de N em cobertura foi realizada após os cortes da parte aérea da planta, com duas aplicações de 56 kg ha⁻¹ de N.

2.4.2 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂, CH₄ E N₂O

2.4.2.1 PERÍODO E INTERVALOS DE AVALIAÇÃO DAS COLETAS DE AR

As avaliações da emissão de N₂O, CH₄ e CO₂ deram-se no vigésimo primeiro/vigésimo segundo ano de condução do experimento, com um total de 32 avaliações, iniciando em 12/12/2010, quando os sistemas estavam com soja (exceto o sistema Al-Mi) e continuaram até o dia 12/12/2011, cerca de três meses após a semeadura do milho. Entre as avaliações, quatro se deram no período de verão/outono (dezembro a maio), coincidindo com o ciclo da soja (exceto no sistema Al-Mi), 17 no período outono/inverno (maio a setembro) nas culturas do trigo, aveia, ervilhaca, azevém e alfafa e 11 no período de primavera (setembro a dezembro) quando predominava a cultura do milho (exceto no sistema Tr-So). Houve coletas mais frequentes nos períodos posteriores a fertilização nitrogenada de cobertura do milho e do trigo, e da dessecação seguida de rolagem das culturas de cobertura (aveia, ervilhaca, azevém e alfafa). Após a fertilização do trigo e do milho realizaram-se coletas e avaliações aos 1, 3, 5, 7, 10 e 16 dias após aplicação no trigo e 1, 3, 5, 8, 11 e 15 dias após aplicação no milho. No período posterior a rolagem das culturas de cobertura realizou-se avaliações aos 1, 4, 6, 10, 15, 21, 27 e 34 dias após.

Nas ocasiões de fertilização de cobertura do milho e do trigo, e do manejo das culturas de cobertura, duas microparcelas de 1 x 1 m foram delimitadas nas parcelas principais. No

centro da microparcela foi afixada uma base de metal para coleta das amostras de ar. Tanto dentro das bases de metal quanto na área compreendida pela microparcela, a uréia a ser aplicada foi previamente pesada de acordo com a dose estabelecida e distribuída de forma homogênea sobre o solo, sem incorporação. O mesmo foi feito com os resíduos culturais da aveia, ervilhaca, azevém e alfafa, onde todo o resíduo da parte aérea das culturas dentro de cada base e microparcela foi previamente retirada, e depois distribuída uniformemente sobre o solo em quantidades correspondentes a massa medida a campo de 5,0, 3,5, 1,1 e 1,8 Mg ha⁻¹ de massa seca, respectivamente.

2.4.2.2 COLETAS A CAMPO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE AR

As amostras de ar foram coletadas com base no método da câmara estática (Mosier, 1989; Parkin, 2003). No momento das coletas, cada câmara (0,33 m de diâmetro e 0,35 m de altura), assentava-se sobre uma base de metal (diâmetro interno de 0,32 m) que foi fixada no solo a uma profundidade de três centímetros no início do estudo. A base de metal possuía uma canaleta de dois centímetros de largura, onde a câmara foi acoplada. O isolamento entre o ambiente interno e externo da câmara era assegurado por uma borracha fixada na borda da câmara, permitindo um encaixe justo. As bases foram retiradas do campo apenas na hora da semeadura e colheita das culturas. Cada câmara foi construída com um ventilador interno para homogeneização do ar, um termômetro para medição da temperatura interna da câmara e uma válvula de saída do ar, utilizada para a coleta de amostras do ar interno da câmara.

Para minimizar qualquer efeito da temperatura na emissão diária dos GEE, as coletas foram realizadas no período das 10:00 as 12:00 horas, período considerado ideal por representar o fluxo médio de emissão diário (Jantalia et al., 2008). As amostras de ar de dentro das câmaras foram coletadas com o uso de seringas de polipropileno de 10 mL, nas duas microparcels de cada parcela, e colocadas em uma caixa de isopor, e mantidas em baixas temperaturas (< 7°C) durante o percurso experimento-Laboratório. No laboratório da

UFPR, as amostras foram transferidas para frascos de vidro (12 ml Exetainer, Labco) com vácuo e depois enviadas para análise no Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre–RS). A concentração dos GEE (N₂O, CH₄ e CO₂) foi obtida por cromatografia gasosa, em equipamento Shimadzu GC 2014 modelo “Greenhouse”, equipado com três colunas empacotadas funcionando a 70°C, N₂ como gás de arraste a um fluxo de 26 mL min⁻¹, injetor com alça de amostragem direta de 1 mL e temperatura de 250° C, detector de captura de elétrons (DCE) a 325° C para detecção do N₂O e de ionização de chama (DIC) a 250° C para CH₄.

As emissões de N₂O e CH₄ em µg m⁻² h⁻¹ e do CO₂ em mg m⁻² h⁻¹ foram obtidas através da variação da concentração desses gases nos tempos 0, 15 e 30 minutos dentro da câmara, sendo o volume molar (V_m) do gás dentro da câmara corrigido pela temperatura medida no momento da coleta e os fluxos (f) do N₂O, CH₄ e CO₂ calculados de acordo com a seguinte fórmula (Jantália et al., 2008):

$$f = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{m}{V_m}$$

em que: $\Delta C/\Delta t$ é a variação na concentração do N₂O, CH₄ ou CO₂ durante o período de incubação (30 minutos); V e A são respectivamente o volume interno da câmara (0,031 m³) e área do solo (0,083 m²) coberta pela câmara, e m é o peso molecular do N₂O, CH₄ ou CO₂.

Integrando-se os resultados de emissão dos GEE ao longo do tempo de avaliação (1 ano) foi possível obter a emissão acumulada anual do N₂O, CH₄ e CO₂ por hectare. Para o N₂O, especificamente, obteve-se a emissão acumulada no período de pós-manejo das plantas de cobertura (20 dias).

2.4.3 PARÂMETROS DO SOLO (DENSIDADE DO SOLO, POROSIDADE, UMIDADE, POROSIDADE PREENCHIDA COM ÁGUA E N INORGÂNICO)

A densidade e porosidade (macro e microporosidade) foram determinadas em novembro/dezembro de 2010 através da coleta de amostras indeformadas de solo pelo método do anel volumétrico, na camada de 0-5 cm. Coletaram-se quatro amostras por parcela. Para o cálculo da densidade e porosidade utilizou-se a metodologia descrita em Embrapa (1997).

Para cada coleta de ar, analisou-se a umidade gravimétrica e a quantidade de nitrogênio inorgânico (NH_4^+ e NO_3^-) na camada de 0-5 cm de profundidade, em duas amostras compostas de solo (4 sub-amostras) por parcela do experimento, em três parcelas, retiradas da microparcela de 1 x 1 m em torno de cada base. A umidade gravimétrica foi determinada através de secagem do solo em estufa a 105 °C por 24 horas. O N-inorgânico foi determinado por colorimetria num aparelho Shimadzu UV 1601, em que o NO_3^- foi obtido pela leitura da absorção ultravioleta e o NH_4^+ pelo método do fenato. Obteve-se a solução contendo o N-inorgânico por meio de agitação (40 minutos) de 10 g de solo e 30 mL de KCl 2 M (relação solo:extrator de 1:3), seguido de filtragem (filtro faixa preta) e centrifugação (10 minutos a 2.500 rpm).

A porosidade preenchida com água (PPA %) foi calculada com base nos valores de umidade gravimétrica de cada coleta e densidade do solo de acordo com a fórmula:

$$\text{PPA} = [(\theta \text{ g x } \sigma_s) / (1 - \sigma_s / \sigma_p)] \times 100 \text{ onde :}$$

- θ g: umidade gravimétrica (kg kg^{-1});

- σ_s : densidade do solo (Mg m^{-3});

- σ_p : densidade de partícula, 2,65 (Mg m^{-3}).

2.4.4 CUSTOS DE OPERAÇÕES E INSUMOS AGRÍCOLAS E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (PAG)

Para estimar os custos em C-CO₂-eq relativos ao consumo de diesel pelas operações agrícolas (semeadura, pulverizações e colheita) e pela produção, transporte e aplicação de insumos (nitrogênio, fósforo, potássio e calcário), demandados pelos sistemas de culturas, utilizaram-se informações do histórico de 21 anos da área, obtendo-se uma média anual. Para estimar o C-CO₂-eq emitido referente às operações e insumos agrícolas utilizou-se informações de Lal (2004). Para estimar o C-CO₂-eq emitido pela produção de sementes, utilizaram-se informações presentes em West & Marland (2002).

O potencial de aquecimento global foi calculado a partir da emissão anual acumulada de N₂O e CH₄, da diferença no estoque de carbono do solo dos sistemas de culturas em relação ao sistema utilizado como linha de base (Tr-So), dividido pelo tempo de implantação do experimento (21 anos) e dos custos dos sistemas em C-eq. Inicialmente as emissões de N₂O e CH₄ foram convertidas para C-eq, da seguinte maneira:

- N₂O

$$N_2O \text{ (C-eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) = [(N_2O \text{ (kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1})) \times \frac{44 \text{ (massa molar do N}_2\text{O)}}{28 \text{ (massa molar do N)}}] \times 296 \times \frac{12 \text{ (massa molar do C)}}{44 \text{ (massa molar do CO}_2\text{)}}$$

- CH₄

$$CH_4 \text{ (C-eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) = [(CH_4 \text{ (kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1})) \times \frac{16 \text{ (massa molar do CH}_4\text{)}}{12 \text{ (massa molar do C)}}] \times 23 \times \frac{12 \text{ (massa molar do C)}}{44 \text{ (massa molar do CO}_2\text{)}}$$

em que: 296 e 23 são o potencial de aquecimento do N₂O e do CH₄, respectivamente, em relação ao CO₂, de acordo com Six et al. (2004).

Após a conversão do N₂O e do CH₄ para C-eq, e de posse dos valores dos custos e do sequestro de C (capítulo 2) calculou-se o PAG total (em kg C-eq ha⁻¹ ano⁻¹) para cada sistema da seguinte maneira:

$$PAG = CH_4 + N_2O + \text{Custos} - \text{Sequestro de C}$$

Calculou-se também o PAG parcial, em que se considerou o sistema Tr-So como linha de base para todos os gases, subtraindo-se o PAG total obtido pelos sistemas pelo PAG total obtido no sistema Tr-So.

2.4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As taxas de emissão e emissão acumulada foram submetidas a análise de variância (ANOVA) seguidas de teste de Tukey ($p < 0,10$), utilizando o programa Estatística 8. As análises de regressão foram realizadas com o programa SigmaPlot 10.0.

2.5 RESULTADOS

2.5.1 EMISSÃO DE N_2O

As emissões de N_2O (Figura 2.1) em dezembro de 2010 (coleta 1) foram relativamente baixas para todos os sistemas (média de $4 \mu g N m^{-2} h^{-1}$) e essa tendência se manteve em janeiro de 2011 (coleta 2) exceto no tratamento Az-Mi-Az-So, cuja emissão subiu para $118 \mu g N m^{-2} h^{-1}$. Em fevereiro (coleta 3), 116 dias após a semeadura, todos os sistemas com soja apresentaram um pico de emissão (média de $96 \mu g N m^{-2} h^{-1}$), enquanto o sistema com alfafa (Al-Mi) manteve a emissão próxima da linha de base. Do início de maio (coleta 4) até meados de julho (coleta 11), as emissões permaneceram relativamente baixas (média de $8 \mu g N m^{-2} h^{-1}$), havendo apenas um pequeno pico de emissão na coleta 8 nos sistemas Av-Mi-Tr-So ($53 \mu g N m^{-2} h^{-1}$) e Er-Mi-Tr-So ($28 \mu g N m^{-2} h^{-1}$). Ainda em julho (coletas 12,13 e 14), as emissões voltaram a aumentar, com destaque para o sistema Tr-So, que apresentou uma emissão de $63 \mu g N m^{-2} h^{-1}$, 16 dias após a adubação nitrogenada (coleta 14). Subtraindo a emissão acumulada nos 16 dias após a aplicação do N no trigo no sistema Tr-So em relação ao sistema com aveia não adubada (Av-Mi-Tr-So), calculou-se que 0,18 % ($0,2 kg N-N_2O$) do N aplicado no trigo ($112,5 kg ha^{-1}$) foi perdido na forma de N_2O .

Do final de agosto, um dia antes da rolagem das culturas de cobertura (coleta 15), até o início de setembro (coleta 17), as emissões permaneceram relativamente baixas (média de 4

$\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), aumentado seis dias após o manejo (média de $11 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (coleta18). Um pico de emissão ocorreu aos 10 dias após o manejo (coleta 19), principalmente no sistema Er-Mi-Tr-So ($105 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Um segundo pico de emissão ocorreu aos 34 dias após o manejo (coleta 23), sendo os maiores fluxos verificados nos sistemas Al-Mi ($157 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), Er-Mi-Tr-So ($133 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) e Az-Mi-Az-So ($131 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). O sistema Er-Mi-Tr-So ($0,17 \text{ kg N ha}^{-1}$) foi o que mais emitiu no período de pós-manejo das culturas de cobertura (20 dias), enquanto os sistemas Al-Mi ($0,02 \text{ kg N ha}^{-1}$) e Tr-So ($0,04 \text{ kg N ha}^{-1}$) foram os que menos emitiram (Figura 2.2).

Em meados de outubro, cinco dias após a adubação nitrogenada nos sistemas com milho (coleta 26), ocorreram os maiores fluxos de N_2O do período de avaliação (média de $291 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), os quais diminuíram até uma média de ($51 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) no começo de novembro (coleta 30).

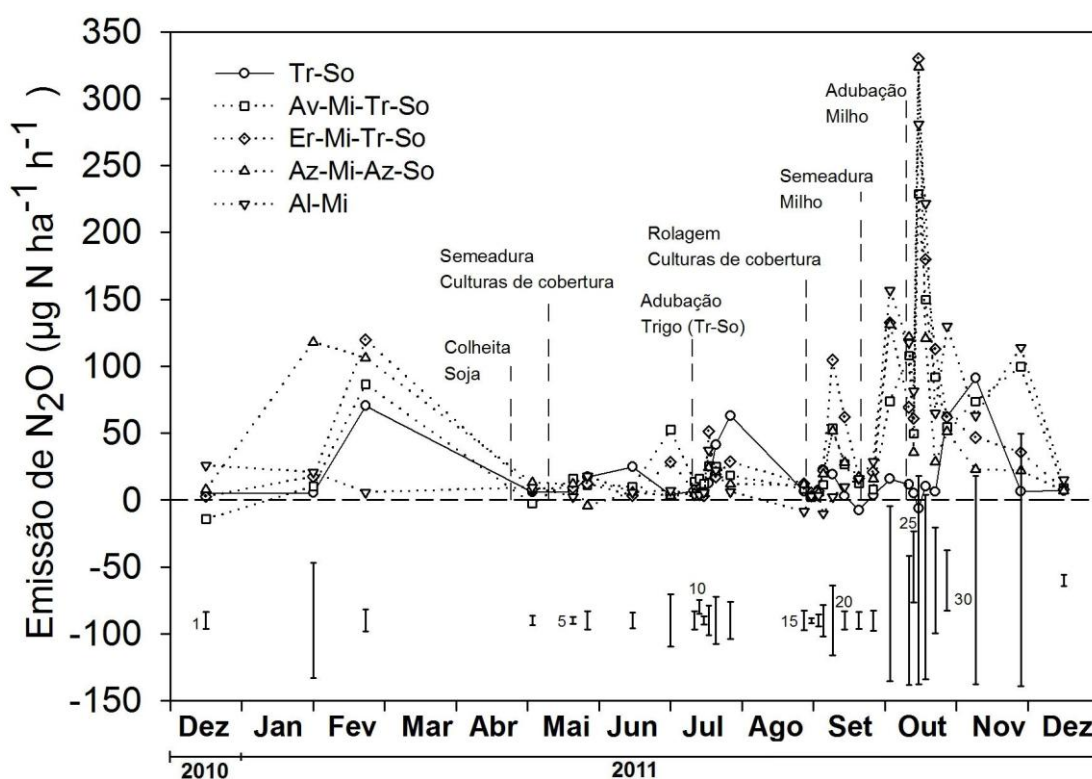


FIGURA 2.1. Taxas de emissão de $\text{N-N}_2\text{O}$ do solo sob sistemas de culturas em plantio direto. Barras verticais significam a diferença mínima estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). Números próximos as barras correspondem ao numero de ordem de coleta. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

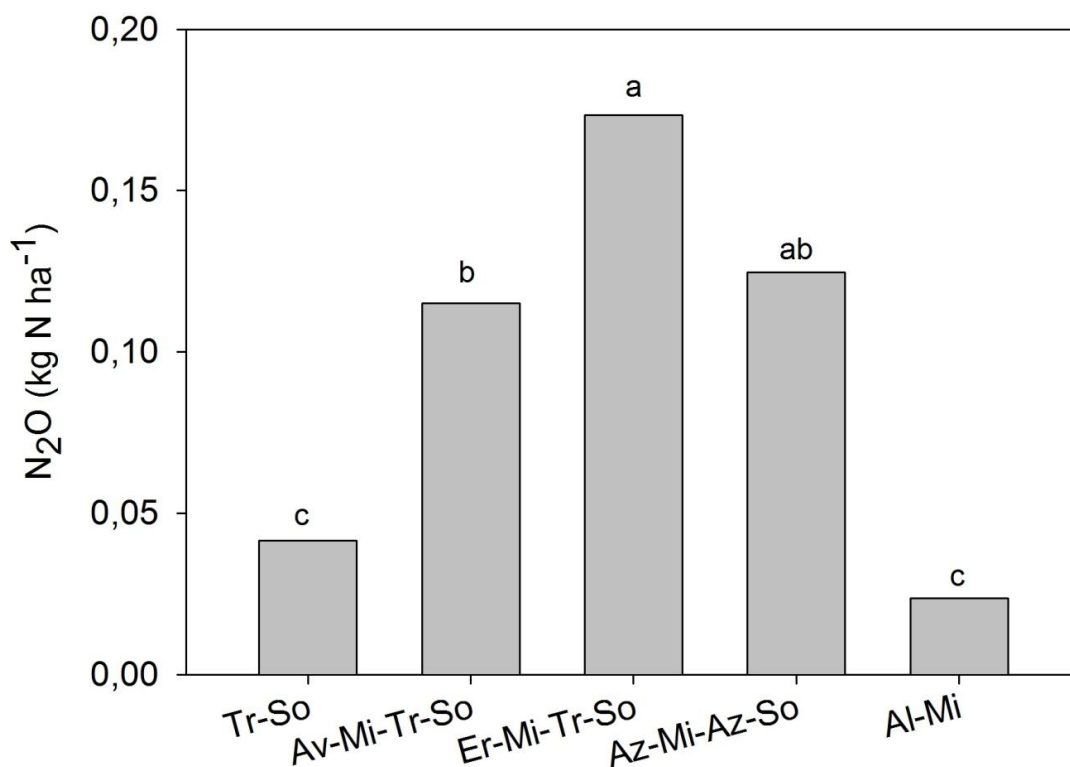


FIGURA 2.2. Emissão acumulada de N-N₂O do solo (20 dias) sob sistemas de culturas em plantio direto no período de pós-manejo das culturas de cobertura. Barras com a mesma letra no topo não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 10% de significância. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

A emissão anual acumulada de N₂O foi maior nos sistema Az-Mi-Az-So (4,1 kg N ha⁻¹), intermediária nos sistemas Er-Mi-Tr-So e Av-Mi-Tr-So (3,4 e 3,0 kg N ha⁻¹, respectivamente) e menor nos sistemas Tr-So e Al-Mi (2,1 e 2,3 kg N ha⁻¹, respectivamente) (Figura 2.3).

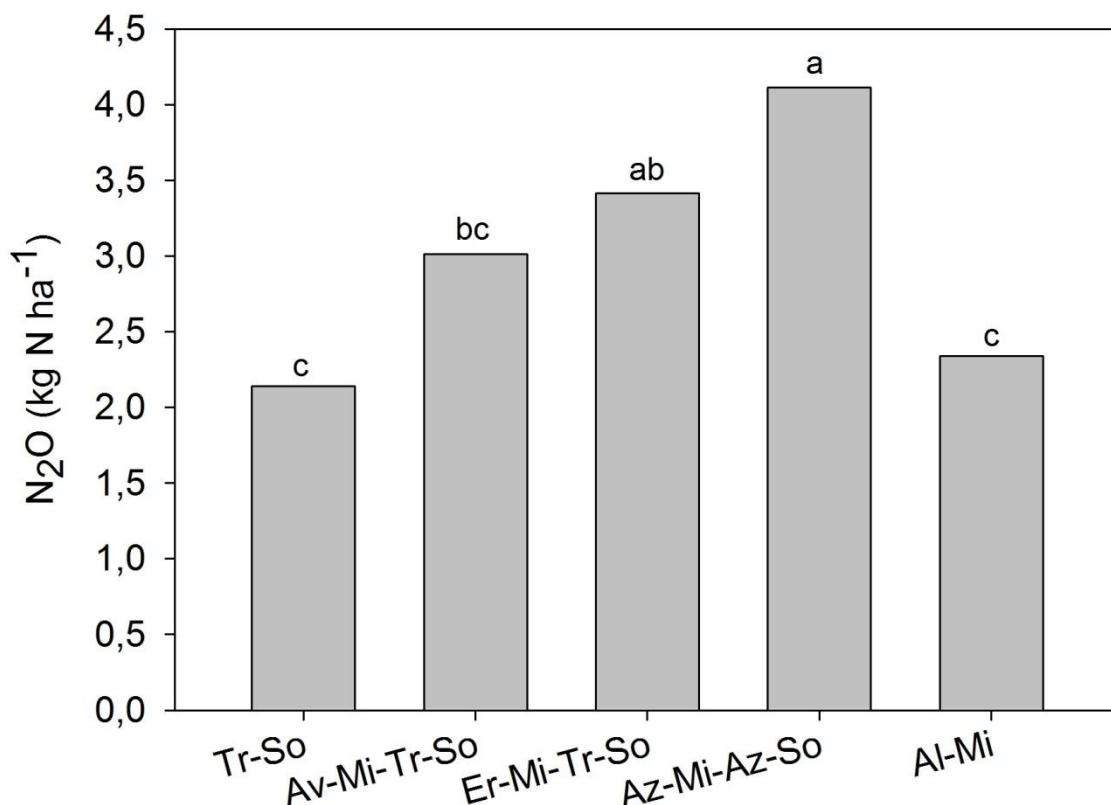


FIGURA 2.3. Emissão anual acumulada de N-N₂O do solo sob sistemas de culturas em plantio direto. Barras com a mesma letra no topo não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 10% de significância. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

2.5.2 EMISSÃO DE CH₄

Os fluxos de metano foram negativos na maioria das coletas, principalmente até o final de maio (coleta 6), porém mostraram-se muito variáveis no decorrer do ano e na maioria das coletas e não apresentaram uma tendência clara entre os sistemas, variando de 95,5 $\mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ no sistema Tr-So, no final de agosto (coleta 15), a -88,4 $\mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ no sistema Al-Mi, no começo de setembro (coleta 21) (Figura 2.4).

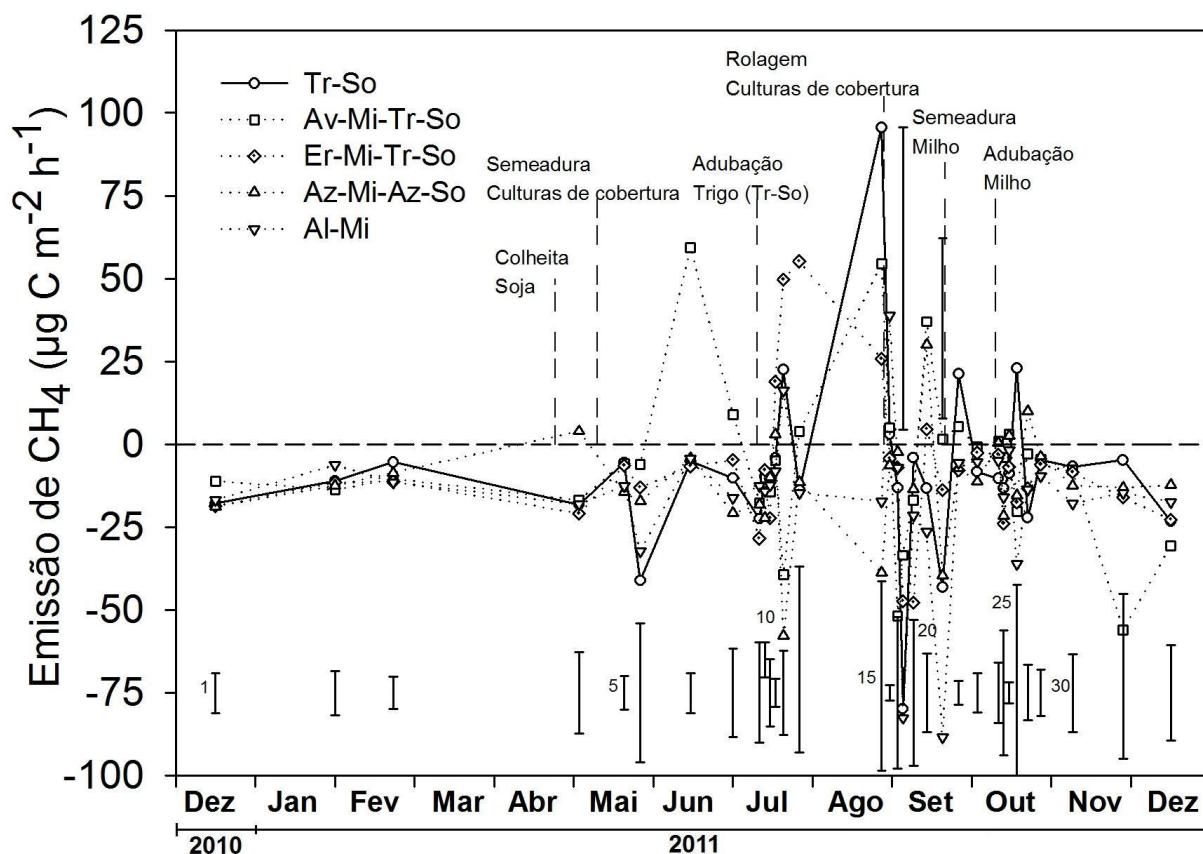


FIGURA 2.4. Taxas de emissão de C-CH₄ do solo sob sistemas de culturas em plantio direto. Barras verticais significam a diferença mínima estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). Números próximos as barras correspondem ao numero de ordem de coleta. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

Não foi verificado um possível aumento nas emissões de CH₄ após o manejo das leguminosas de cobertura e fertilização nitrogenada quando comparado a sistemas com gramíneas e que não receberam fertilizante, respectivamente.

Na emissão anual acumulada todos os sistemas se comportaram como dreno de CH₄ (Figura 2.5). O sistema Al-Mi apresentou o maior influxo de metano ($-1,34 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), e os sistemas Av-Mi-Tr-SO e Er-Mi-Tr-SO o menor (média de $-0,48 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

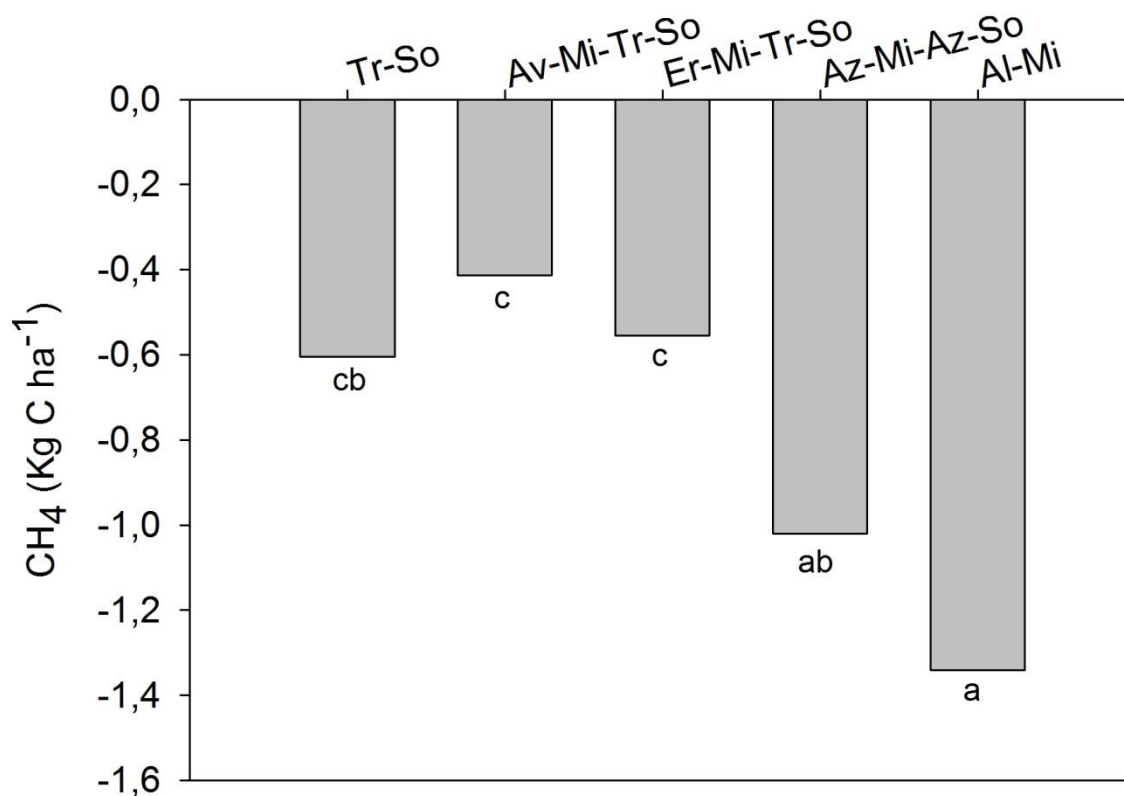


FIGURA 2.5. Emissão anual acumulada de C-CH₄ em solo submetido a sistemas de culturas em plantio direto. Barras com a mesma letra no topo não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 10% de significância. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

2.5.3 EMISSÃO DE CO₂

O fluxo de CO₂ apresentou grande variação sazonal e entre os sistemas (Figura 2.6).

Um pico expressivo de emissão ocorreu em janeiro (coleta 2), para os quatro sistemas com soja (média de 532 mg C m⁻² h⁻¹), e na sequência os fluxos diminuíram para níveis mais baixos, observados em maio (coletas 4,5 e 6) (média de 77 mg C m⁻² h⁻¹).

Aumento na emissão, em todos os sistemas, foi verificado no final de agosto (coleta 15), três meses e meio após a semeadura das culturas de cobertura, com o sistema Er-Mi-Tr-So emitindo o maior fluxo (659 mg C m⁻² h⁻¹). Após o manejo das culturas de cobertura, as emissões diminuíram, sendo verificado um novo pico apenas no começo de outubro (coleta 23), 32 dias após o manejo (média de 250 mg C m⁻² h⁻¹), voltando a diminuir em seguida. Não se verificando efeito da adubação nitrogenada do milho na emissão de C-CO₂.

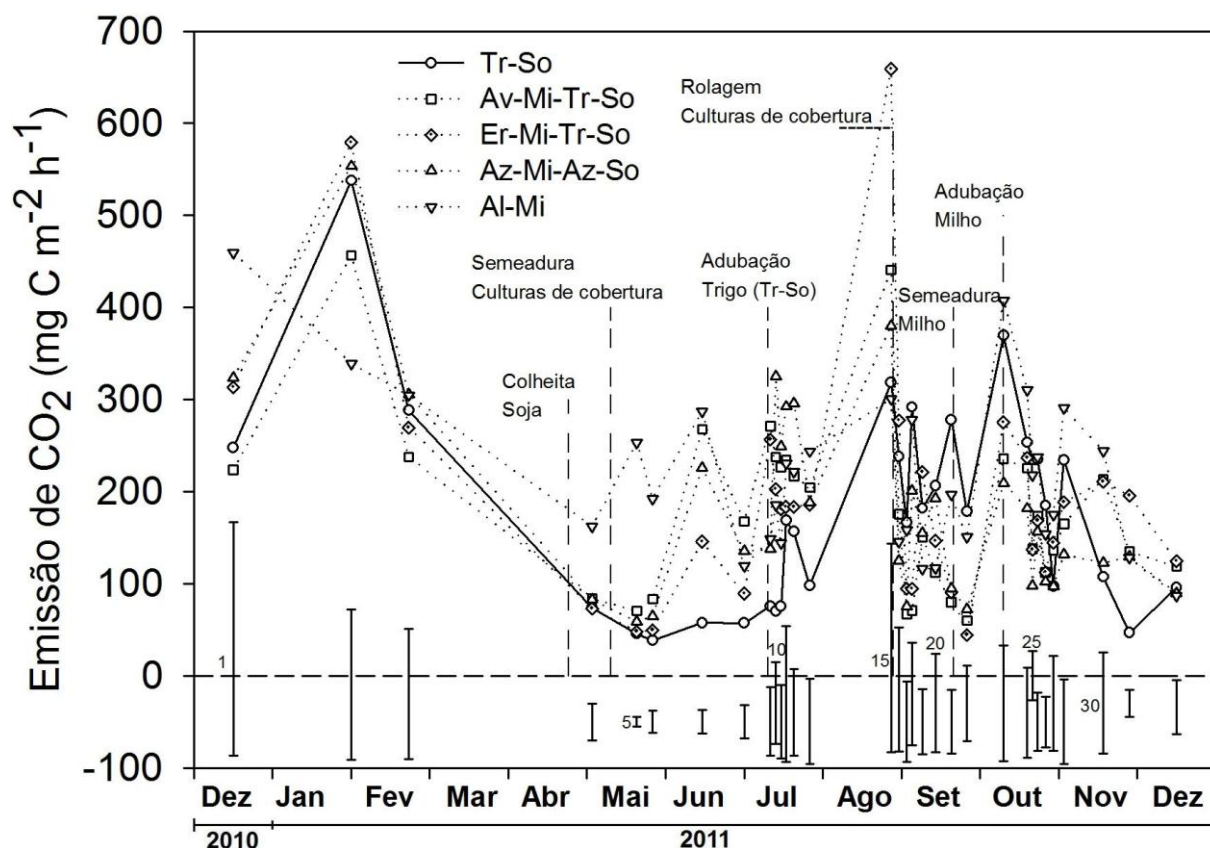


FIGURA 2.6. Taxas de emissão de C-CO₂ do solo sob sistemas de culturas em plantio direto. Barras verticais significam a diferença mínima estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). Números próximos as barras correspondem ao número de ordem de coleta. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

A emissão anual acumulada de CO₂ foi significativamente maior no sistema Al-Mi (22,3 Mg C ha⁻¹), menor nos sistemas Tr-SO e Av-Mi-Tr-SO (17,2 e 18,3 Mg C ha⁻¹, respectivamente) e intermediária nos sistemas Er-Mi-Tr-SO e Az-Mi-Az-SO (20,0 e 19,4 Mg C ha⁻¹, respectivamente) (Figura 2.7). As emissões acumuladas de CO₂ correlacionaram-se com os estoques de C ($R^2 = 0,98$, $p < 0,01$) e N ($R^2 = 0,77$, $p < 0,10$) na camada 0 a 100 cm de solo (Figura 2.8).

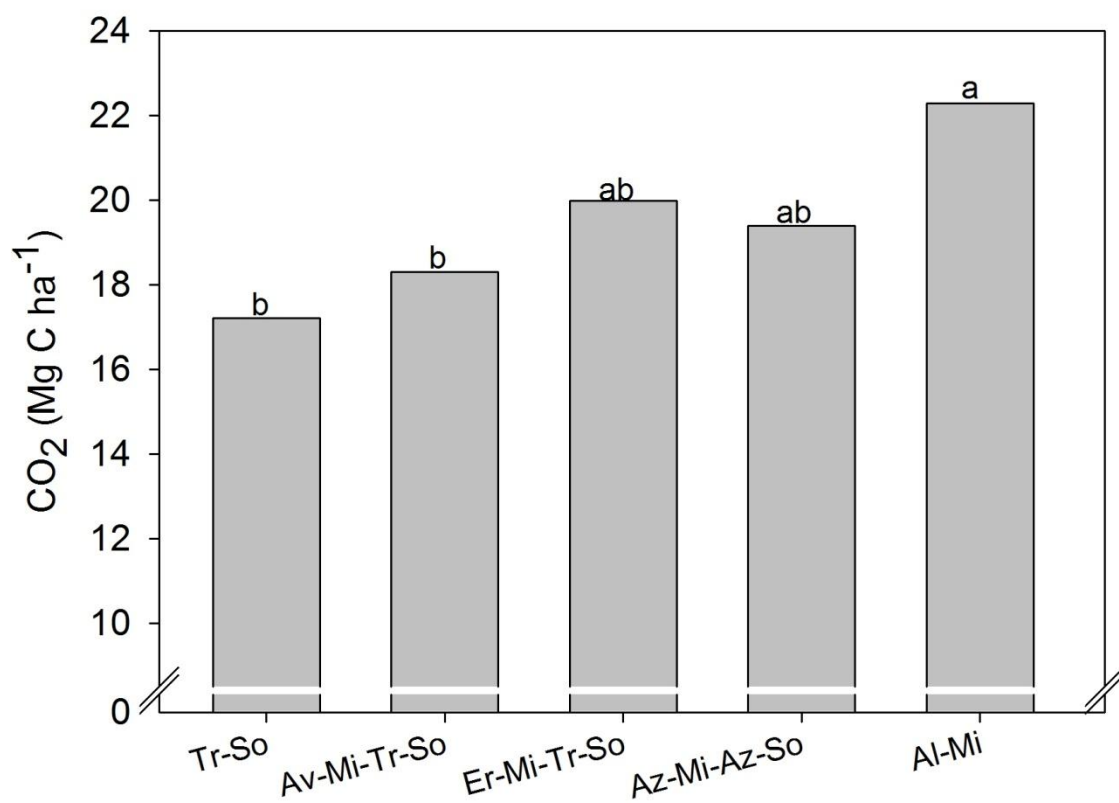


FIGURA 2.7. Emissão anual acumulada de C-CO₂ do solo sob sistemas de culturas em plantio direto. Barras com a mesma letra no topo não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey a 10% de significância. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

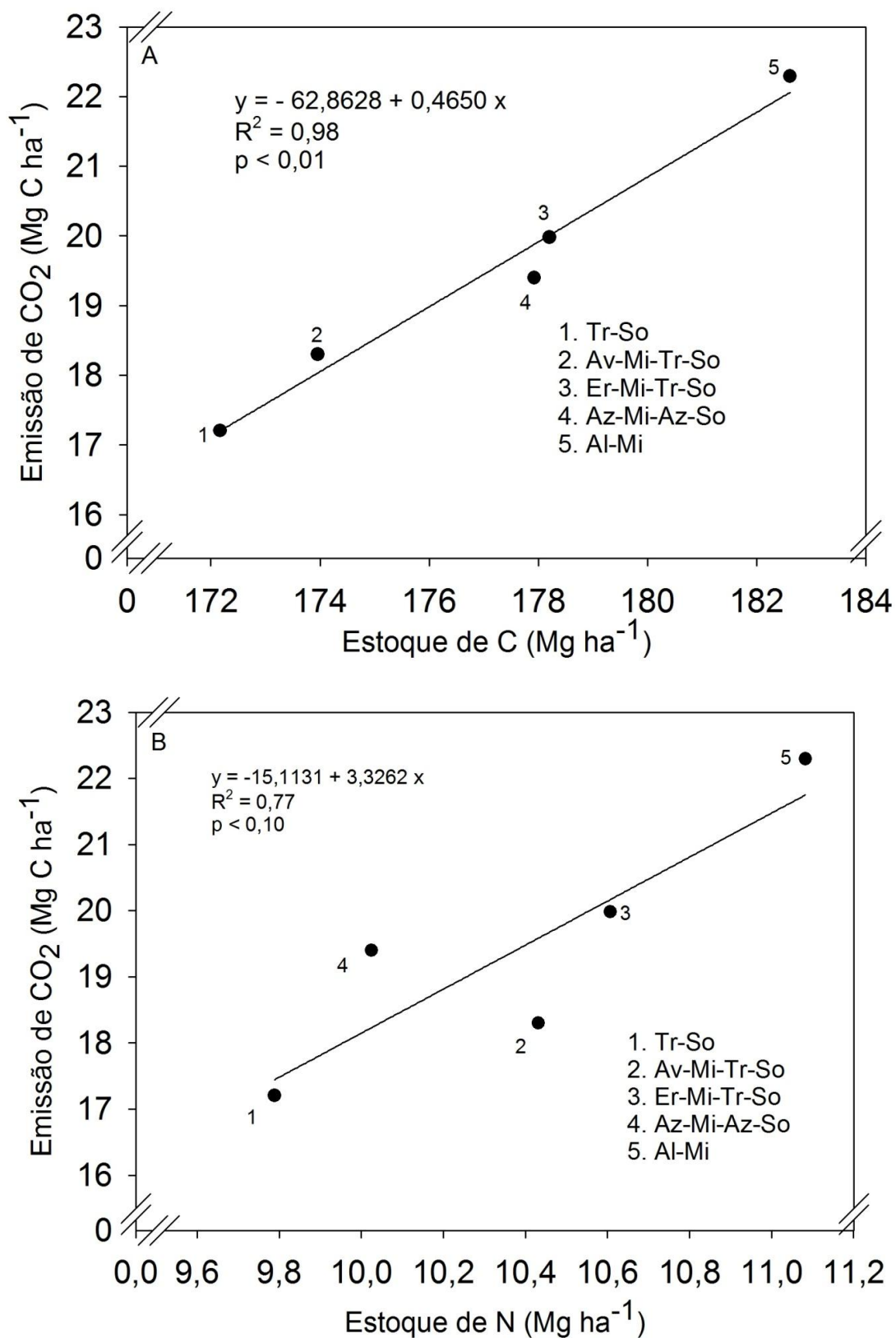


Figura 2.8. Relação entre emissão acumulada de C-CO₂ no período de um ano e estoque de COT (carbono orgânico total) (A) e de NT (nitrogênio total) (B) na camada de 0 a 100 cm do solo em sistemas de culturas em plantio direto. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

2.5.4 PARÂMETROS DE SOLO

As maiores concentrações de NH_4^+ foram observadas 10 dias após a adubação nitrogenada do trigo no sistema Tr-So ($124 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$) (coleta 19), e 5 dias após a adubação nitrogenada do milho (coleta 26), nos sistemas Av-Mi-Tr-So, Er-Mi-Tr-So e Az-Mi-Az-So (165 , 178 e $150 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$, respectivamente) (Figura 2.9A).

As maiores concentrações de NO_3^- foram observadas 21 dias após o manejo das culturas de cobertura (coleta 21), com a ervilhaca (Er-Mi-Tr-So) apresentando a maior concentração ($175 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$), e 11 dias após a adubação nitrogenada do milho (coleta 28), com os sistemas Er-Mi-Tr-So e Az-Mi-Az-So obtendo as maiores concentrações ($132 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$ em ambos os sistemas). (Figura 2.9B).

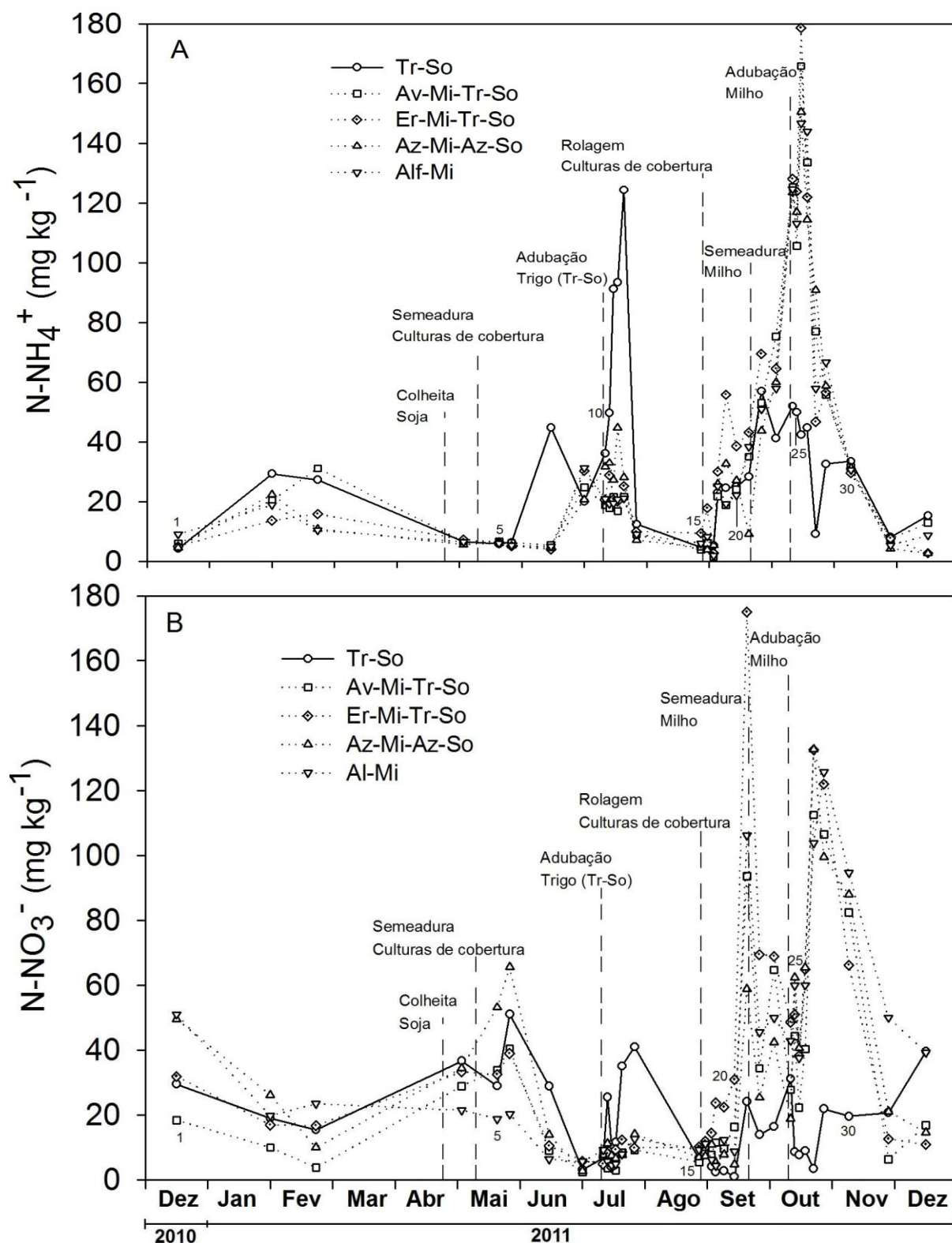


FIGURA 2.9. Concentração de N-NH_4^+ (A) e N-NO_3^- (B) na camada de 0-5 cm do solo sob sistemas de culturas em plantio direto. Números próximos aos símbolos correspondem ao número de ordem de coleta. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

A PPA média do solo de todos os sistemas variou de acordo com as chuvas com um valor médio para o período de 49 % (Figura 2.10). O sistema Az-Mi-Az-So apresentou a maior PPA média (56 %), variando de 75 % PPA em julho, cerca de 30 dias após a semeadura (coleta 8) a 32 % PPA em setembro, cerca de 20 dias após o manejo (coleta 21). O sistema Al-Mi apresentou à menor PPA média (36 %), variando de 23 % PPA em maio (coleta 6), depois de um período de 13 dias sem chuva, a 52 % PPA em julho depois de uma chuva acumulada de 45 mm em três dias.

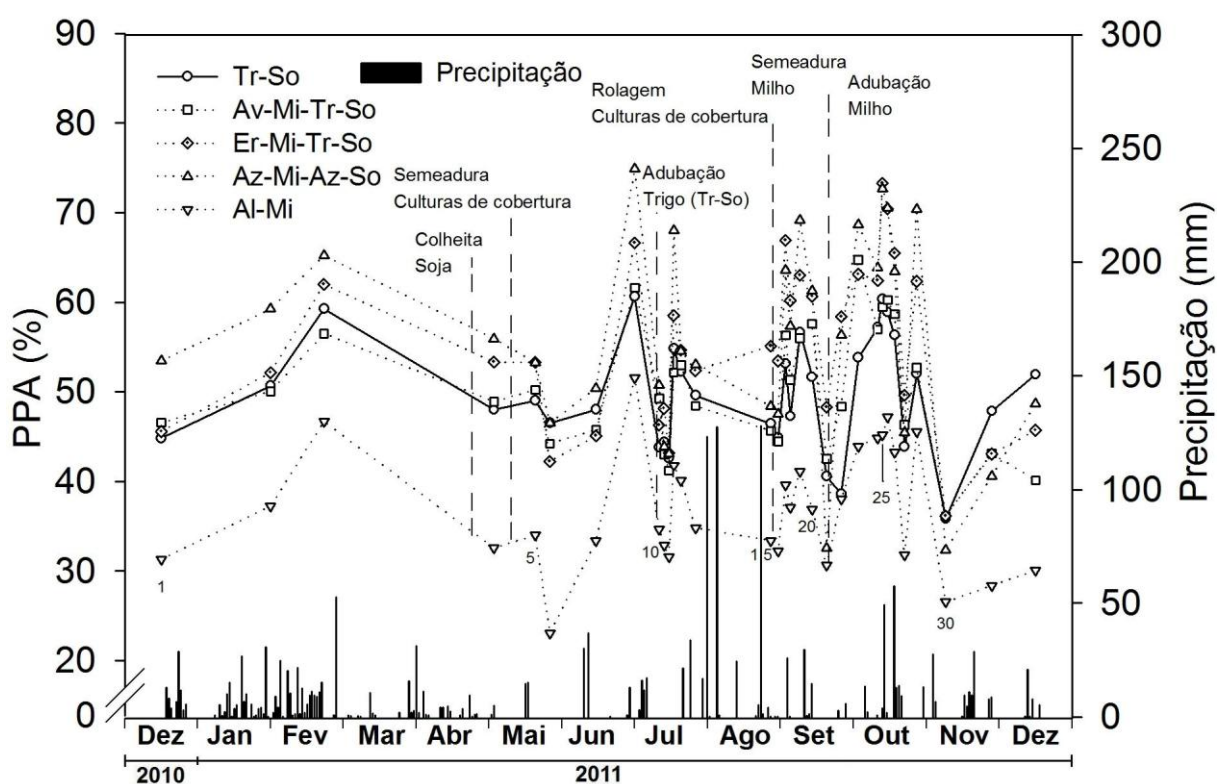


Figura 2.10. Porosidade preenchida por água (PPA) na camada de 0-5 cm do solo sob sistemas de culturas em plantio direto e precipitação (mm). Números próximos aos símbolos correspondem ao número de ordem de coleta. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

Os sistemas Az-Mi-Az-So e Er-Mi-Tr-So apresentaram menor macroporosidade (0,12 e 0,13 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente) e maior microporosidade (0,41 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). O sistema Al-Mi obteve a menor densidade (1,02 Mg m^{-3}), maior macroporosidade (0,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e menor

microporosidade ($0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), juntamente com os sistemas Tr-So e Av-Mi-Tr-So (ambos com $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Tabela 2.2).

TABELA 2.2. Densidade, macroporosidade e microporosidade na camada de 0-5 cm do solo sob sistemas de culturas em plantio direto.

Sistema ⁽¹⁾	Densidade	Macroporosidade	Microporosidade
	Mg m^{-3}	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
Tr-So	1,15 b ⁽²⁾	0,19 b	0,38 b
Av-Mi-Tr-So	1,16 b	0,18 b	0,38 b
Er-Mi-Tr-So	1,19 ab	0,13 c	0,41 a
Az-Mi-Az-So	1,23 a	0,12 c	0,41 a
Al-Mi	1,02 c	0,25 a	0,36 b

(1) So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

(2) Valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

Numa análise conjunta considerando todas as avaliações e todos os sistemas, obteve-se uma relação significativa entre as emissões de N_2O e a concentração de NH_4^+ no solo ($R^2 = 0,63$, $p < 0,001$) (Figura 2.11), o mesmo não foi obtido entre a emissão de N_2O e concentração de NO_3^- no solo (Figura 2.12). Obteve-se relação entre a emissão acumulada de N_2O e a PPA média ($R^2 = 0,69$, $p < 0,10$) (Figura 2.13).

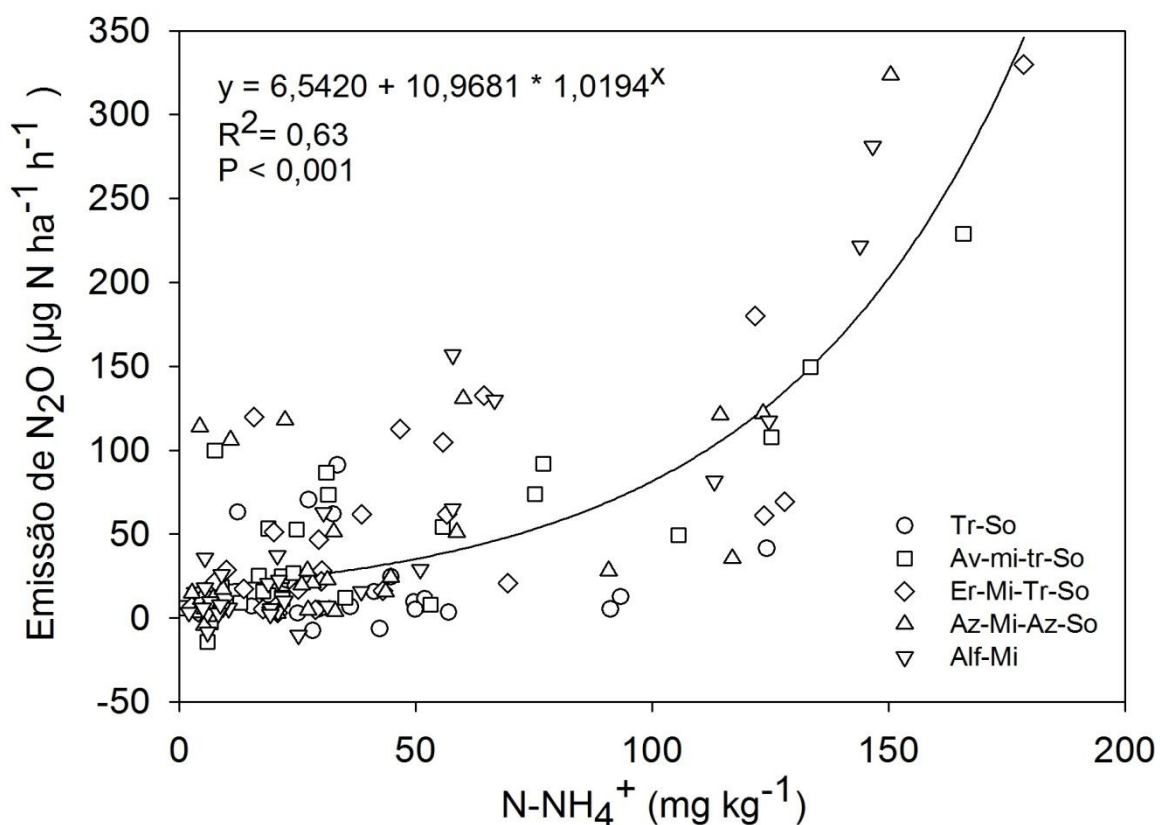


FIGURA 2.11. Relação entre a emissão de N- N_2O e quantidade de amônio na camada de 0-5 cm do solo sob sistemas de culturas em plantio direto.

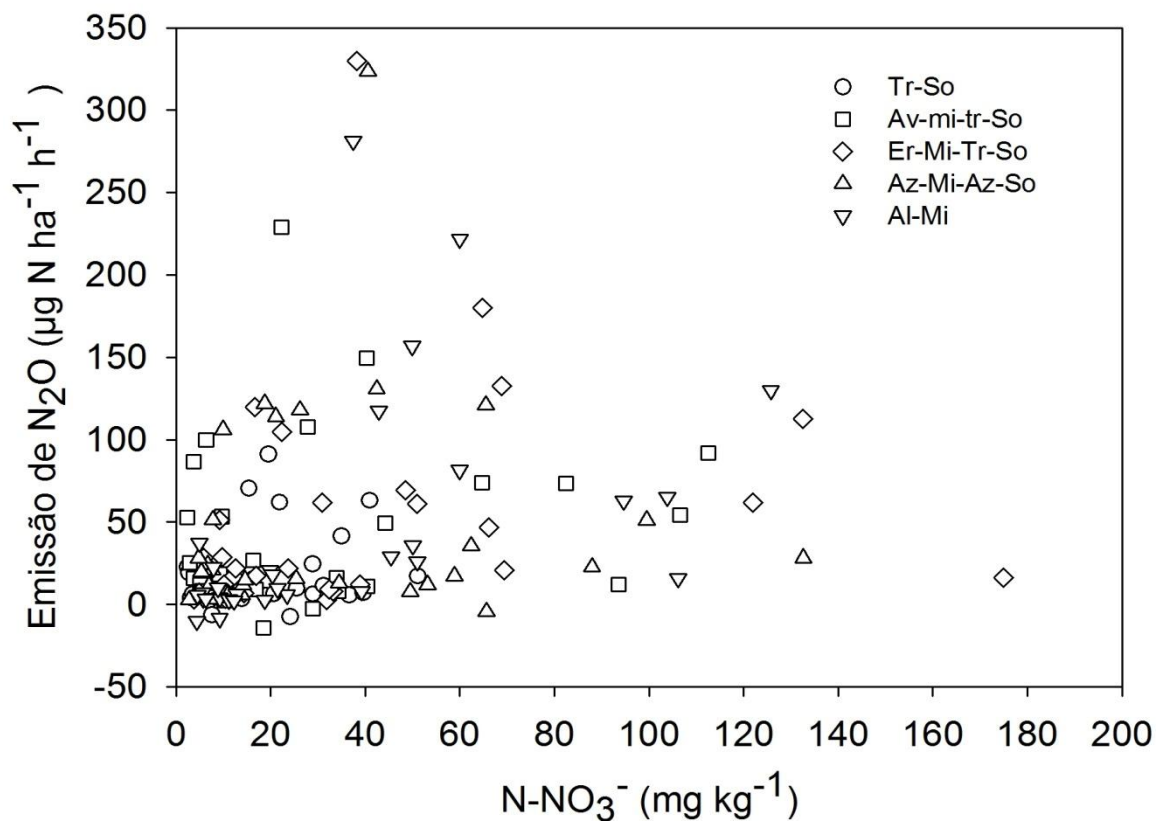


FIGURA 2.12. Relação entre a emissão de N- N_2O e quantidade de nitrato na camada de 0-5 cm do solo sob sistemas de culturas em plantio direto.

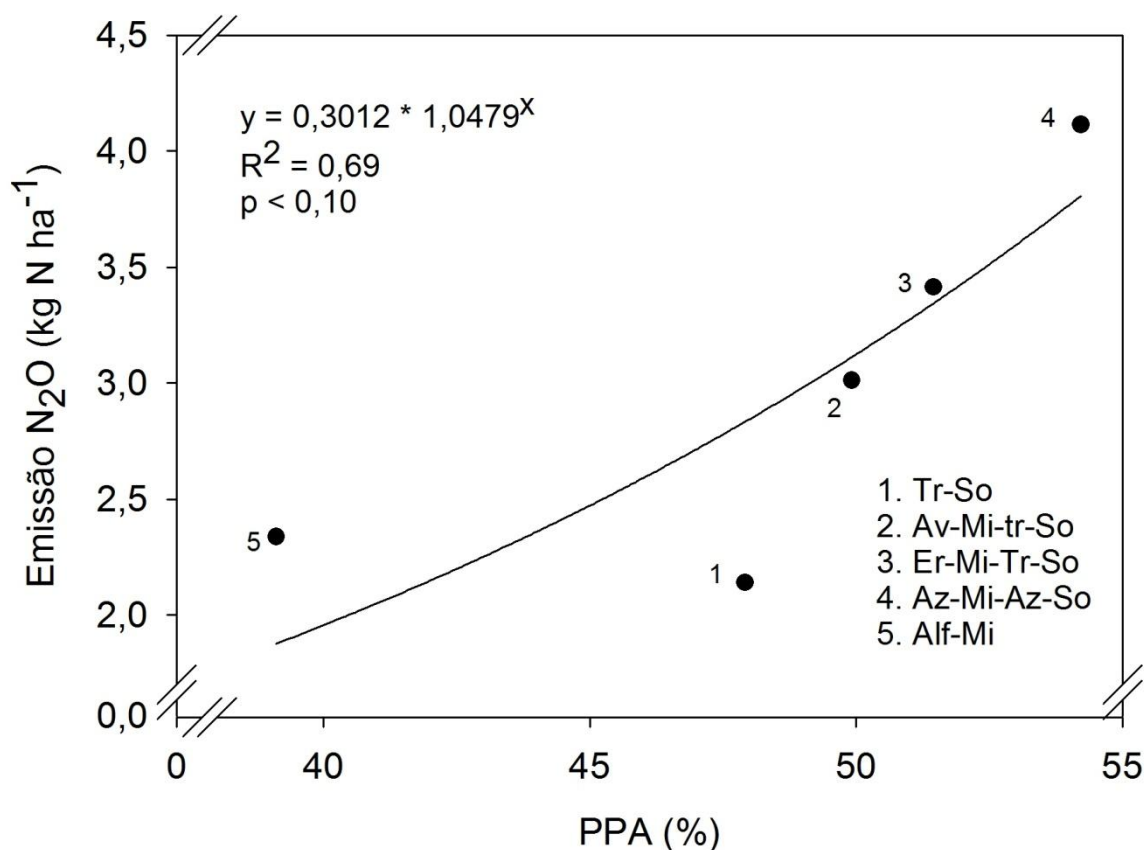


FIGURA 2.13. Relação entre emissão de N-N₂O e Porosidade Preenchida com Água ponderada em percentagem (PPA%) na camada de 0-5 cm do solo sob sistemas de culturas em plantio direto.

As emissões acumuladas de N₂O correlacionaram-se positivamente com a microporosidade do solo ($R^2 = 0,74$, $p < 0,10$) (Figura 2.14A) e negativamente com a macroporosidade ($R^2 = 0,61$, $p = 0,12$) (Figura 2.14B), indicando que quanto maior a microporosidade e menor a macroporosidade, maior é a emissão de N₂O.

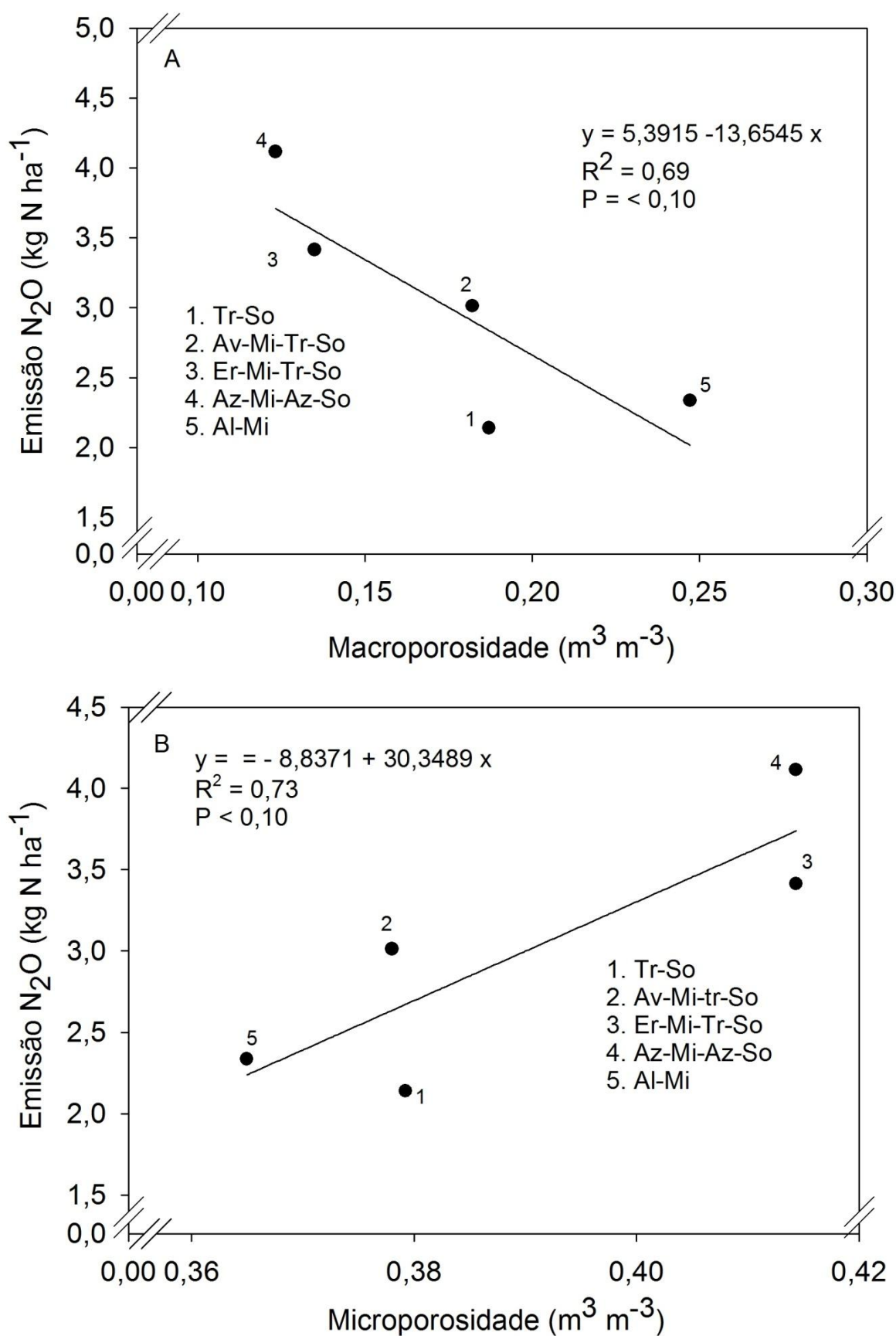


FIGURA 2.14. Relação entre emissão acumulada de N₂O e macroporosidade (A) e microporosidade (B) na camada de 0-5 cm do solo submetido a sistemas de culturas em plantio direto. So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

Não foram verificadas relações entre emissão de CH_4 e CO_2 com os parâmetros PPA, NH_4^+ , NO_3^- , macroporosidade, microporosidade e densidade do solo quando relacionadas todas as coletas e sistemas de culturas e também em momentos específicos como após a adubação nitrogenada e rolagem das culturas de cobertura.

2.5.5 CARACTERIZAÇÕES METEOROLÓGICAS

A precipitação comportou-se de forma sazonal, com maiores volumes no inverno, nos meses de julho e agosto, com precipitação mensal acumulada de 240 e 318 mm, respectivamente, e menores precipitações no outono, nos meses de abril e maio, com precipitação mensal acumulada de 45 e 32 mm, respectivamente. A temperatura também comportou-se de forma sazonal, com maiores temperaturas médias diárias registradas nos meses de primavera/verão e menores nos meses de outono/inverno. Dados diários de precipitação e temperatura média do ar estão apresentados na Figura 2.15.

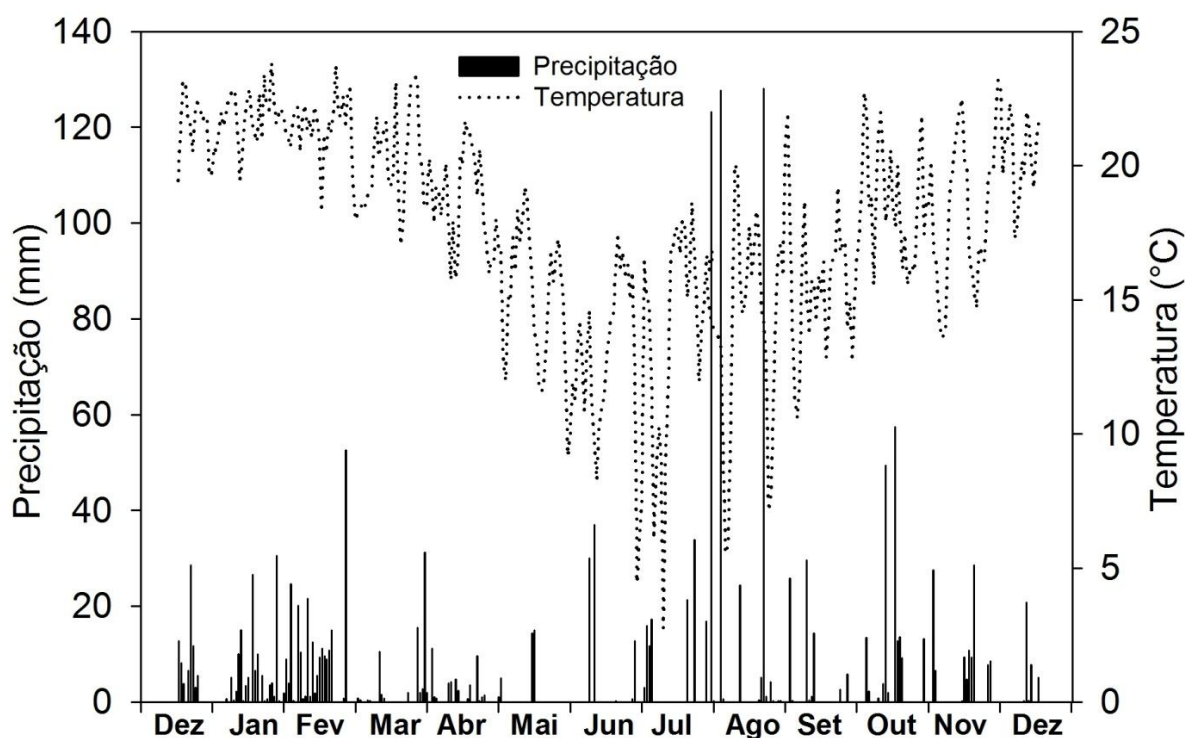


FIGURA 2.15. Precipitação diária e temperatura média diária do ar durante o período de avaliações das emissões de N_2O , CH_4 e CO_2 . Fonte: Instituto Tecnológico SIMEPAR.

Verificou-se relação linear entre emissão média de C-CO₂ ($R^2 = 0,25$, $p < 0,01$) dos sistemas com a temperatura média do ar (Figura 2.16).

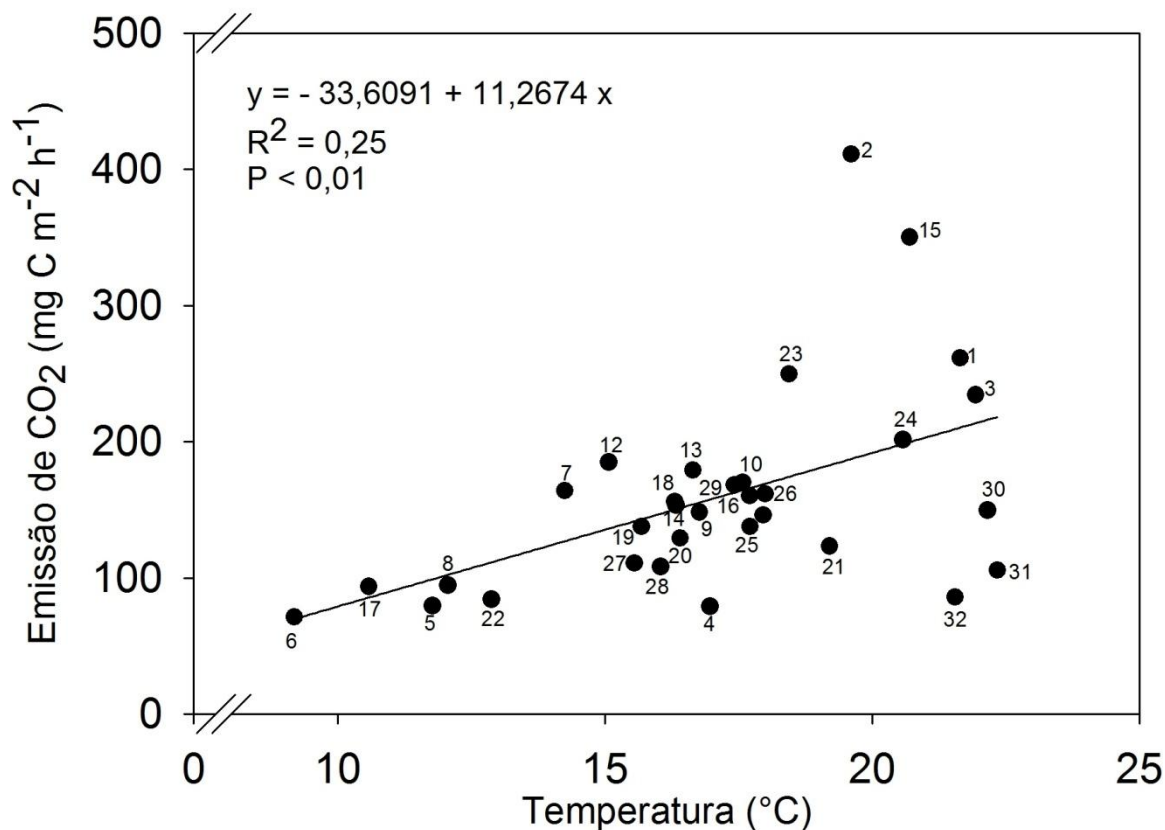


FIGURA 2.16. Relação entre emissão de C-CO₂ média e temperatura média do ar dos dias de coleta em sistemas de culturas em plantio direto. Números próximos aos símbolos correspondem ao numero de ordem de coleta.

2.5.6 CUSTO DE OPERAÇÕES E INSUMOS AGRÍCOLAS EM C-CO₂-EQ

Os sistemas Al-Mi e Az-Mi-Az-So apresentaram os maiores custos totais (698,8 e 652,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹) e os sistemas Tr-So, Av-Mi-Tr-So e Er-Mi-Tr-So os menores (média de 440,1 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹) (Tabela 2.4). O custo associado aos insumos culturais representou a maior parte (média de 311,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹) (Tabela 2.3), enquanto o custo associado às operações (média de 99,0 kg C-CO₂-eq ha⁻¹) (Tabela 2.3) e calcário (média de 111,0 kg C-CO₂-eq ha⁻¹) (Tabela 2.4) representaram a menor parte.

TABELA 2.3. Emissão anual média de CO₂ equivalente com relação às práticas agronômicas (operações e insumos) das culturas.

Fonte		Custos das culturas ⁽¹⁾ (kg C-CO ₂ -eq ha ⁻¹)							Observações
		So	Mi	Tr	Av	Er	Az	Al ⁽²⁾	
Operações									
Semeadura		3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8 kg C-CO ₂ eq ha ⁻¹ por operação de semeadura (Lal, 2004).
Pulverizações		14,0	12,6	11,2	2,8	1,4	2,8	39,2	1,4 kg C-CO ₂ eq ha ⁻¹ por operação de pulverização (Lal, 2004). Dez pulverizações na soja nove no milho, oito no trigo, duas na aveia, uma na ervilhaca, duas no azevém e vinte e oito na alfafa.
Aplicação em cobertura de fertilizante		7,6	15,2	15,2	0,0	0,0	22,8	53,2	7,6 kg C-CO ₂ eq ha ⁻¹ por operação de aplicação de fertilizante (Lal, 2004). Uma na soja, duas no milho, duas no trigo, três no azevém e sete na alfafa.
Corte e retirada da parte aérea		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,7	126,7	13,6 e 3,3 kg C-CO ₂ eq ha ⁻¹ para o corte e enfardamento da parte aérea, respectivamente (Lal, 2004). Três cortes seguidos de enfardamento do azevém e sete/oito cortes e enfardamento da alfafa.
Colheita		7,4	10,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4 e 10 kg C-CO ₂ eq ha ⁻¹ para colheita da soja e do milho, respectivamente (Lal 2004). Para o trigo considerou-se a mesma emissão da colheita da soja.
Total de operações		32,8	41,6	37,6	6,6	5,2	80,1	222,9	
Insumos									
Sementes		12,0	20,0	14,0	6,0	16	22,5	15,6	0,2, 1,0, 0,1, 0,1, 0,5 e 2,6 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ de sementes de soja, milho, aveia, azevém e alfafa, respectivamente (West & Marland, 2002). 60, 20, 140, 60, 80, 45 e 15 kg de sementes ha ⁻¹ para o o milho, soja, trigo, aveia, ervilhaca, azevém e alfafa, respectivamente. Para a ervilhaca considerou-se a mesma emissão da semente de soja.
Fertilizantes	Nitrogênio	0,0	222,3	145,1	0,0	0,0	191,0	0,0	1,3 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ N (Lal, 2004). 171, 127 e 147 kg N ha ⁻¹ no milho, trigo e azevém, respectivamente.
	Fósforo	14,0	19,2	13,6	0,0	0,0	12,8	86,4	0,2 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ P ₂ O ₅ (Lal, 2004). 70, 96, 68, 64, e 432 kg P ha ⁻¹ na soja, milho, trigo, azevém e Alfafa, respectivamente.
	Potássio	10,2	11,7	7,8	0,0	0,0	10,2	216,0	0,15 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ k ₂ O (Lal, 2004). 68, 78, 52, 68 e 1.440 kg k ₂ O ha ⁻¹ na soja, milho, trigo, azevém e alfafa, respectivamente.
Agroquímicos	Herbicida	8,2	37,2	6,9	6,9	6,9	6,9	15,7	6,3 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ herbicida (Lal 2004). 1,3, 5,9, 1,1, 1,1, 1,1, 1,1 e 2,5 kg herbicida ha ⁻¹ para a soja, milho, trigo, aveia, ervilhaca, azevém e alfafa, respectivamente.
	Inseticida	3,0	1,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	5,1 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ herbicida (Lal, 2004). 602, 301, 14 e 42 g inseticida ha ⁻¹ para a soja, milho, trigo e alfafa, respectivamente.
	Fungicida	0,5	0,5	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9 kg C-CO ₂ eq kg ⁻¹ fungicida (Lal 2004). 125, 125 e 622 g fungicida ha ⁻¹ para a soja, milho e trigo, respectivamente.
Total de insumos		47,9	312,4	189,9	12,9	22,9	243,4	333,9	
Custo total em C-CO ₂		80,7	354,0	227,5	19,5	28,1	323,5	556,8	

(1) So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

(2) Para alfafa considerou-se o período de um ano.

TABELA 2.4. Custos em CO₂ equivalente pelos sistemas de culturas em plantio direto

Sistema ⁽¹⁾	Custos (kg C-CO ₂ -eq ha ⁻¹)				
	Total no ciclo ⁽¹⁾	Nº de anos ⁽²⁾	Média anual para culturas ⁽³⁾	Calcário ⁽⁴⁾	Total do sistema
Tr-So	308,2	1	308,2	102,4	410,6
Av-Mi-Tr-So	681,7	2	340,8	112,0	452,8
Er-Mi-Tr-So	690,3	2	345,1	112,0	457,1
Az-Mi-Az-So	1081,7	2	540,8	112,0	652,8
Al-Mi	1746,0	3	582,0	116,8	698,8

(1) So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

(2) Número de anos para completar um ciclo do sistema.

(3) Divisão do total no ciclo pelo número de ano.

(4) 0,116 kg C-CO₂eq kg⁻¹ de calcário (Lal, 2004). Média anual de aplicação de calcário de 640, 700, 700, 700 e 730 kg ha⁻¹ para os sistemas Tr-So, Av-Mi-Tr-So, Er-Mi-Tr-So, Az-Mi-Az-So e Al-Mi.

2.5.7 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (PAG)

Todos os sistemas agiram como fonte de GEE para a atmosfera (Tabela 2.5), com um valor médio de 684,8 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹, o sistema Al-Mi obteve o menor PAG total (486,6 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹) enquanto o sistema Az-Mi-Az-So obteve o maior (892,1 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹), sendo que em média, o custo dos sistemas de culturas foi o fator que mais contribuiu no PAG, seguido da emissão de N₂O. Todos os sistemas oxidaram CH₄, porém o efeito no PAG foi pouco significativo, devido à baixa quantidade oxidada.

TABELA 2.5. Potencial de Aquecimento Global (PAG) em relação ao Tr-So, e PAG total para os sistemas de culturas em plantio direto baseado no sequestro de C, emissão de gases do efeito estufa (GEE) e custos de insumos e operações. Sinal negativo indica potencial de mitigação do aquecimento global em C-CO₂eq.

Sistema ⁽¹⁾	kg C-CO ₂ -eq ha ⁻¹ ano ⁻¹					
	N ₂ O	CH ₄	C ⁽²⁾	Custos	PAG total	PAG parcial
Tr-So	271,6	- 5,1	-	410,6	677,1	-
Av-Mi-Tr-So	382,2	- 3,5	- 61,4	452,8	770,1	93,0
Er-Mi-Tr-So	433,1	- 4,6	- 287,4	457,1	598,1	- 79,0
Az-Mi-Az-So	522,0	- 8,5	- 274,2	652,8	892,1	215,0
Al-Mi	296,5	- 11,2	- 497,5	698,8	486,6	- 190,5

(1) So: soja; Mi: milho; Tr: trigo; Av: aveia; Er: ervilhaca; Az: azevém; Al: alfafa.

(2) Dados de sequestro de C do capítulo 2.

O sistema Tr-So exibiu um PAG total de 677,1 kg C ha⁻¹ ano⁻¹, mais da metade (60%) foi contribuição dos custos, enquanto que 40% foi contribuição da emissão de N₂O. Em nenhum dos sistemas, o sequestro de C foi suficiente para contrabalancear o C-eq emitido

pela emissão combinada do N_2O e dos custos, e assim nenhum sistema representou uma efetiva contribuição na mitigação dos GEE.

Porém, quando avaliado o PAG parcial os sistemas com leguminosas para cobertura (Er-Mi-Tr-So) e forragem (Al-Mi) apresentaram potencial de mitigação dos GEE ($-79,0$ e $-190,5 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente), enquanto os sistemas com gramíneas para cobertura (Av-Mi-Tr-So) e forragem (Az-Mi-Az-So) agiram como fonte de GEE ($93,0$ e $215,0 \text{ kg C-CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente).

2.6 DISCUSSÃO

2.6.1 EMISSÃO DE N_2O

Durante o período de verão, os picos de emissão encontrados nos sistemas com soja, aos 116 dias após a semeadura (coleta 3), coincidindo com o início da fase de maturação da cultura (Figura 2.1), devem ser atribuídos a morte de raízes e nódulos, com consequente liberação de nitrogênio (NH_4^+) (Figura 2.9A), o que estimulou a emissão de N_2O , como sugerido por Yang & Cai (2005), que obtiveram emissões crescentes a partir de 82 dias após a emergência da soja, com um fluxo máximo de $628 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ aos 111 dias. Ciampitti et al. (2008) em experimento de campo na Argentina, estudando o efeito da inoculação e adubação da soja na emissão de N_2O , observou resultados semelhantes, com aumento da emissão coincidindo com o início da fase de enchimento de grãos, 100 dias após a semeadura, e um pico de emissão de $5516 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, na fase de maturação, aos 142 dias.

As baixas emissões no período compreendido entre a coleta 4 e 11 (Figura 2.1) estão possivelmente relacionadas a baixa umidade (PPA%) (Figura 2.10) neste período, com médias pouco acima de 40%, com exceção da oitava coleta, e também a baixa quantidade de NH_4^+ , principalmente nas coletas 4, 5 e 6 (média de $6,2 \text{ mg N-NH}_4^+$) (Figura 2.9A). Mesmo nas primeiras coletas (9, 10 e 11) após a adubação nitrogenada do trigo, no sistema Tr-So, não houve elevação das emissões, sendo verificado aumento na emissão apenas na coleta 12 e

principalmente na coleta 13, quando a PPA%, no sistema Tr-So, estava em 55 e 52%, respectivamente, uma vez que a nitrificação aumenta rapidamente com aumento do conteúdo de água, tendo seu ideal entre 55 e 65% (Davidson et al., 2000; Dalal et al., 2003). Isto resultou em uma baixa conversão do N aplicado em N_2O (0,2 %), que também deve ter sido resultado da volatilização da amônia (NH_3), que pode chegar a 70% do N aplicado em condições de solo com baixa umidade (Carvalho et al., 2006). Jantalia et al. (2008), em condições subtropicais, também não verificaram altos fluxos de N_2O na adubação do trigo e sugeriram que baixas temperaturas podem ter interferido nos processos de produção de N_2O .

A emissão acumulada no período de pós-manejo está possivelmente relacionada a qualidade e quantidade dos resíduos. A maior emissão de N_2O no sistema Er-Mi-Tr-So deve-se à grande quantidade de resíduos ($3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) de baixa relação C/N que favorece a mineralização do N orgânico, sendo as maiores emissões verificadas 10 (coleta 19) e 15 (coleta 20) dias após o manejo, quando a quantidade de NH_4^+ (Figura 2.9A) e a PPA% (Figura 2.10) no solo deste sistema eram as maiores para o período, o que provavelmente potencializou a emissão de N_2O . A menor emissão no sistema Al-Mi, pode ser atribuída possivelmente a uma maior relação lignina/N da alfafa em relação à ervilhaca, que possivelmente retardou a mineralização do N orgânico da alfafa, mesmo sendo uma leguminosa, e também a menor quantidade de resíduos ($1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$), sendo quase duas vezes menor que a ervilhaca, não se verificando elevação de N inorgânico (Figura 2.9A) com relação aos demais sistemas. Vahdat et al. (2011) encontraram que quanto maior a relação lignina/N menor é a mineralização do N e Gomes et al. (2009) verificaram menores emissões de N_2O no período de pós-manejo de plantas de cobertura de maior relação linina/N.

As elevadas emissões de N_2O verificadas neste estudo após a fertilização nitrogenada do milho estão de acordo com outros estudos (Weier, 1999; Venterea et al., 2005; Mcswiney & Robertson, 2005; Zanatta et al., 2010). As maiores emissões ocorreram quando as

concentrações de NH_4^+ nos sistemas fertilizados foram máximas (média de 115 mg kg^{-1}) (Figura 2.9A) e a PPA média situava-se em 61% (coleta 26) (Figura 2.10), o que, provavelmente, criou condições favoráveis para a atividade microbiana aeróbica, e conseqüentemente para a ocorrência da nitrificação (Linn & Doran, 1984).

A relação entre emissão de N_2O e concentração de NH_4^+ no solo (Figura 2.11) e a ausência de relação entre NO_3^- e N_2O (Figura 2.12), indicam que o processo de nitrificação é possivelmente o principal contribuinte para a emissão de N_2O . Esta possibilidade ainda é reforçada pela elevada aeração, que em virtude da rápida drenagem inerente aos Latossolos determina baixos valores de PPA durante o ano, e ainda, a deposição de resíduos em superfície nos solos sob plantio direto favorece a formação de uma boa estrutura, aumentando a aeração.

Entretanto, apesar de alguns fatores relacionados ao manejo serem determinantes na emissão de N_2O , em determinadas épocas (ex. adubação, deposição de resíduos no solo, etc), no longo prazo (1 ano), obteve-se relação entre a emissão acumulada anual e as propriedades físicas de macroporosidade, microporosidade e PPA média dos sistemas (Figuras 2.14 e 2.13, respectivamente). O sistema Az-Mi-Az-So, apresentou a maior emissão anual de N_2O ($4,1 \text{ kg N-N}_2\text{O}$), e menor macroporosidade e maior microporosidade, juntamente com o sistema Er-Mi-Tr-So (Tabela 2.2), que também apresentou elevada emissão anual de N_2O ($3,4 \text{ kg N-N}_2\text{O}$) (Figura 2.2). Esta tendência manteve-se quando avaliado a PPA média, em que o sistema Az-Mi-Az-So obteve a maior PPA média e maior emissão de N_2O , enquanto o sistema Al-Mi obteve a menor PPA média e menor emissão de N_2O . Esses fatores podem interferir na disponibilidade de O_2 , afetando a atividade microbiana e por consequência os processos de nitrificação e desnitrificação (Bremmer, 1997; Smith et al., 2003). Maior microporosidade e maior PPA resulta em maior ocorrência de poros com baixo suprimento de O_2 , aumentando as emissões devido a uma maior ocorrência de desnitrificação, enquanto que

maior macroporosidade e menor PPA favorece a difusão de oxigênio, resultando em menores emissões devido a uma maior ocorrência da nitrificação. A maior produção de N_2O em sistemas mais compactados é consistente com o reportado em outros trabalhos em que a menor aeração (Rochette, 2008) e uma maior compactação pelo tráfego (Hansen et al., 1993; Ball et al., 1999; Ruser et al., 2006) resultaram em maiores emissões de N_2O .

As emissões acumuladas de N_2O foram maiores que as verificadas em outros estudos em sistemas de culturas com leguminosas na região Subtropical do Brasil. Jantalia et al. (2008) verificou emissões acumuladas entre 0,74 e 1,95 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ para os sistemas Soja/Trigo e Soja/Ervilhaca e Gomes et al. (2009) encontrou emissões acumuladas entre 1,32 e - 0,07 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ para os sistemas Feijão de Porco (*Cajanus cajan* L.) + Milho e Aveia/Milho. Para o sistema Al-Mi, em que a alfafa predominou em 10 dos 12 meses de avaliação, as emissões acumuladas foram menores que as verificadas por Wagner-Riddle et al. (1997) no Canadá (3,2 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) e por Mosier et al. (1996) (4,0 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) para leguminosas. Isto deve-se principalmente ao fato de que, em comparação aos trabalhos na região Sul do Brasil, este estudo, além de avaliar as emissões decorrentes do manejo das culturas de cobertura, avaliou ainda as emissões relacionadas a adubação nitrogenada do milho, em que verificou-se os maiores picos de emissão. Outros fatores relacionados ao clima, a estrutura do solo, a população microbiana e ao manejo são determinantes na emissão de N_2O , tornando a comparação da emissão acumulada entre locais distintos de difícil realização e com grandes variações.

2.6.2 EMISSÃO DE CH_4

O balanço entre a emissão de CH_4 por bactérias metanogênicas em condições anaeróbicas e a oxidação de CH_4 por bactéria metanotróficas em condições aeróbicas determina se um solo age como fonte ou dreno de CH_4 para a atmosfera, podendo os dois

processos ocorrerem simultaneamente em nichos do ambiente solo. De acordo com Smith et al. (2003) os solos aerados agem como dreno de CH_4 atmosférico, sendo a PPA e a densidade do solo, fatores relacionados a difusividade do CH_4 e do O_2 , os principais controladores das emissões em solos aeróbicos por limitar a oxidação do CH_4 (Smith et al. 2003; Templeton et al., 2006). Para este solo em estudo, a baixa PPA média verificada (49%) está próxima da PPA de 45 %, valor em que a oxidação do CH_4 foi máxima no estudo de Khalil & Baggs (2005), o que é devido a rápida drenagem deste solo. No entanto, não se obteve uma relação entre PPA e propriedades físicas dos sistemas com a emissão de CH_4 .

Apesar do reconhecido efeito da elevada quantidade de NH_4^+ na diminuição da oxidação do CH_4 devida a competição pela enzima monooxigenase (Bodelier & Lannbroek., 2004; Jang et al., 2006), vários trabalhos não tem reportado aumento na emissão pelo solo quando submetido a aplicação de fertilizantes nitrogenados e/ou plantas ou resíduos com elevado teor de N (Hutsch et al., 1993; Dobbie & Smith, 1996; Weier, 1999; Metay et al., 2007). Este efeito tem sido sugerido por muitos autores ao fato de que apenas em solos onde nunca ou raras vezes aplicou-se fertilizante nitrogenado é que há um efeito na diminuição da oxidação do CH_4 e que solos onde a anos aplica-se N mineral este efeito não é mais verificado, provavelmente devido a alterações na comunidade microbiana, tanto pela simples troca de bactérias intolerantes ao NH_4^+ por bactéria tolerantes, e/ou pelo aumento no número de bactérias consumidoras de CH_4 (Bodelier & Lannbroek, 2004).

As taxas de emissão de CH_4 (Figura 2.4) e o total acumulado no período de um ano (Figura 2.5), estão de acordo com outros estudos desenvolvidos em solos aerados sob plantio direto. Kessavalou et al. (1998) verificaram crescentes taxas de absorção de CH_4 com a diminuição do revolvimento, em taxas médias de - 7,7 g e - 8,9 g C- CH_4 m⁻² h⁻¹ em plantio direto e campo nativo, respectivamente. Em Ohio, EUA, em sistema de plantio direto de longa duração com monocultura do milho, verificou-se um fluxo médio anual de - 0,40 µg C-

$\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ com um influxo acumulado anual de $-0,32 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ (Ussiri et al., 2009). O efeito positivo do sistema de plantio direto na absorção de CH_4 é atribuído a maior difusão de O_2 e CH_4 para o solo via macroporos e melhor condição de vida para os microorganismos metanotróficos (Hutsch, 1998). No entanto quando avaliado o efeito de rotação de culturas na emissão de CH_4 alguns trabalhos tem reportado diferenças (Abao et al. 2000; Gomes et al., 2006) e outros não (Robertson et al. 2000; Onomode et al., 2007), sendo as diferenças geralmente atribuídas a variação da qualidade de resíduos na oxidação do metano. Gomes (2006) verificou um fluxo médio anual de $-2,0$ a $11 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ nos sistemas Ervilhaca/Milho e Feijão de Porco + Milho, respectivamente, atribuindo esta diferença a maior quantidade de N aportado pelo Feijão de Porco.

A maior oxidação de CH_4 pelo sistema Al-Mi ($-1,34 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Figura 2.5) deve-se, principalmente, a maior macroporosidade ($0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) na camada de 0-5 cm (Tabela 2.2), que permite uma maior difusão de O_2 e CH_4 atmosférico para dentro do solo, permitindo uma maior atividade de bactérias metanotróficas, que utilizam o CH_4 como fonte de C e o O_2 para a respiração (Le Mer & Roger, 2001). Aliado a isto, o elevado teor de carbono e nitrogênio, e uma provável melhor estrutura do solo, devida a menor passagem de máquinas, criam melhores condições físicas, químicas e biológicas que definem o nicho ecológico em que as bactérias metanotróficas agem (Willison et al., 1995).

2.6.3 EMISSÃO DE CO_2

O CO_2 é produzido principalmente pela respiração de microorganismos heterotróficos e pela vegetação (principalmente raízes), os quais, para um mesmo solo, são dependentes do clima (temperatura e umidade), do estágio vegetativo das culturas e da quantidade e qualidade dos resíduos presentes no solo. Neste estudo, verificou-se relação entre a temperatura e emissão de CO_2 (Figura 2.16), o que é corroborado por outros trabalhos que apontam a

temperatura como a principal variável meteorológica (Parkin & Kaspar, 2003; Jabro et al., 2008), por acelerar a decomposição e oxidação da matéria orgânica, a atividade microbiana e de raízes e processos de mineralização do C (Jabro et al., 2008), exceto quando o solo está muito seco (Smith et al., 2003).

A respiração das raízes contribui significativamente nas taxas de respiração do solo, tendo uma participação entre 12 e 38 % em sistemas agrícolas (Buyanovsky & Wagner, 1995) dependendo do tempo de vida e da quantidade de raízes (Raich & Tufekcioglu, 2000). Assim, é de se esperar que quanto mais denso o sistema radicular, maior será a emissão de CO₂ pelo solo. Isto pode explicar os dois picos de emissão verificados nas coletas 2 e 15 (Figura 2.6), quando o desenvolvimento radicular tanto da soja na coleta 2, como das culturas de cobertura na coleta 15, provavelmente estavam em adiantado desenvolvimento. A maior emissão no sistema Er-Mi-Tr-So na coleta 15 deve ser atribuído ainda ao melhor microclima criado aos microorganismos, como sugerido por Raich & Tufekcioglu (2000), devida a maior conservação da umidade proporcionado pela elevada quantidade de parte aérea (3,5 Mg ha⁻¹ de matéria seca) e arquitetura prostrada da ervilhaca. A semeadura do trigo um mês após as outras culturas do inverno pode explicar a tendência do sistema Tr-So apresentar as menores emissões de CO₂ devido o menor desenvolvimento radicular, enquanto que o sistema radicular denso e perene da alfafa, pode explicar a tendência desse sistema de apresentar as maiores taxas de emissão de CO₂, como pode ser observado principalmente nas coletas 4, 5, 6 e 7, período em que as outras culturas estavam no início do desenvolvimento, e consequentemente com sistemas radiculares menos desenvolvidos.

Assim a emissão acumulada de CO₂ é resultado da respiração das raízes, mas também da atividade dos microorganismos do solo, a qual é limitada pela disponibilidade de C e N (Gregorich et al., 2006), sendo verificada relação entre estoque de COT e NT no solo e emissão de CO₂ (Figura 2.8). Quanto maior a disponibilidade desses elementos no solo, maior

tende a ser a respiração da atividade microbiana. Estes fatores podem explicar a elevada emissão acumulada de CO₂ pelo sistema Al-Mi e a menor emissão pelos sistemas Tr-So e Av-Mi-Tr-So.

2.6.4 PAG

Para o período em que se realizaram as avaliações dos GEE, todos os sistemas agiram como fonte de GEE em C-eq para atmosfera (Tabela 2.5), apresentando um PAG total positivo, isto se deve principalmente a dois fatores: (1) ao período em que se fez a medição dos GEE, no qual se verificaram elevadas emissões de N₂O, sendo considerado um período crítico de emissão dentro do ciclo dos sistemas, devida a rolagem das culturas de cobertura e adubação nitrogenada do milho com altas doses de N em todos os sistemas, com exceção do Tr-So; (2) baixas taxas de sequestro de C, principalmente nos sistemas bianuais Az-Mi-Az-So, Av-Mi-Tr-So e Er-Mi-Tr-So, devida a utilização do sistema Tr-So como linha de base no cálculo do sequestro de C, uma vez que na maioria dos trabalhos utiliza-se como referência áreas manejadas sob o preparo convencional.

Apesar de ter os maiores custos em C-eq (Tabela 2.4), o sistema Al-Mi apresentou o menor PAG total (486,6 Kg C-CO₂) e menor PAG parcial (-190, 5 Kg C-CO₂) o que deve-se as maiores taxas de sequestro de C verificadas por este sistema (Tabela 6), provavelmente em razão de ser uma leguminosa de característica semi-perene com elevadas adições de C via raiz, e também a baixa emissão de N₂O em C-eq, mesmo em um ano em que houve a rolagem da alfafa e adubação nitrogenada do milho. Provavelmente, se fosse avaliado o ciclo completo deste sistema, ambos os PAGs seriam muito menores, vide as baixas emissões de N₂O verificadas no período em que a alfafa estava estabelecida. Robertson et al. (2000) verificou um PAG total negativo de – 200 kg C-CO₂-eq ha⁻¹ ano⁻¹ em sistema perene de alfafa, o que foi atribuído principalmente ao elevado sequestro de C verificado (1610 kg C ha ano⁻¹), seguido de ausência de adubação nitrogenada e menor uso de combustível em operações. Porém, vale

ressaltar que Robertson et al. (2000) utilizou um sistema de preparo convencional como linha de base no cálculo do sequestro de C, e neste trabalho, utilizou-se um sistema em plantio direto.

O maior PAG total e parcial verificado no sistema Az-Mi-Az-So é devido principalmente a maior emissão de N_2O entre os sistemas e também aos elevados custos (Tabela 2.5) devido a grande quantidade de N aplicada, tanto no milho como no azevém (Tabela 2.3).

A substituição da Aveia no sistema Av-Mi-Tr-So pela Ervilhaca no sistema Er-Mi-Tr-So resultou em um menor PAG total (598,1 Kg C-CO₂) e parcial (- 79 Kg C-CO₂), uma vez que apesar da maior emissão de N_2O pelo sistema Er-Mi-Tr-So, houve um maior acúmulo de C nesse sistema em comparação ao sistema Av-Mi-Tr-So, o que contrabalanceou essa maior emissão.

Quando analisado o PAG relativo observa-se que os dois sistemas com leguminosas (Al-Mi e Er-Mi-Tr-So) obtiveram um valor negativo, o que provavelmente está relacionado ao maior acúmulo de C nesses sistemas. No entanto, um menor PAG total e parcial poderiam ser alcançado nesses sistemas se uma quantidade menor de N mineral tivesse sido aplicada no milho, o que poderia ser feito pela contabilização do N fixado com posterior subtração desta quantidade no N mineral a ser aplicado no milho, o que provavelmente geraria menores emissões de N_2O , culminando em um PAG ainda menor.

2.7 CONCLUSÕES

O sistema de cultura Az-Mi-Az-So apresentou maior emissão anual de N_2O , possivelmente devido a menor macroporosidade e maior microporosidade que podem favorecer a ocorrência de desnitrificação neste sistema.

Sistemas de culturas em Latossolo sob plantio direto agem como dreno de CH₄, sendo o sistema Al-Mi o que mais oxida CH₄, possivelmente devida a maior macroporosidade.

A emissão de CO₂ relaciona-se diretamente com os estoques de C e N, desta forma, o sistema Al-Mi, devido aos maiores estoques de C e N, é o que mais emite CO₂ em comparação aos sistemas Tr-So e Av-Mi-Tr-So.

Sistemas de culturas em plantio direto agem como fonte de GEE, apresentando um PAG positivo. No entanto, os sistemas com leguminosas Al-Mi e Er-Mi-Tr-So apresentaram menor PAG total e PAG parcial negativo, portanto com potencial de mitigação das emissões de GEE, quando comparado ao sistema Tr-So, em virtude do maior sequestro de C e menor emissão de N₂O, principalmente pelo sistema Al-Mi, enquanto o sistema Az-Mi-Az-So apresenta o maior PAG total e parcial em razão do alto custo e elevadas emissões de N₂O e sequestro de C insuficiente para contrabalancear essas emissões.

2.8 LITERATURA CITADA

ABAO JR, E.B.; BRONSON, K.F.; WASSMANN, R. & SINGH, U. Simultaneous release of methane and nitrous oxide emissions in rice-based cropping systems under rain conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58:131–139, 2000.

ADVIENTO-BORBE, M.A.A.; HADDIX, M.L.; BINDER, D.L.; WALTERS, D.T. & DOBERMANN, A. Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Global Change Biol.*, 13:1972–1988, 2007.

AMOS, B.; ARKEBAUER, T.J. & DORAN, J.W. Soil surface fluxes of greenhouse gases in an irrigated maize-based agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 387-395, 2005.

BAGGS, E.M.; REES, R.M.; SMITH, K.A. & VINTEN, A.J.A. Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. *Soil Use Manage.*, 16:82–87, 2000.

BAGGS, E.M.; STEVENSON, M.; PIHLATIE, M.; REGAR, A.; COOK, H. & CADISCH, G. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertilizer under zero and conventional tillage. *Plant Soil*, 254:361–370, 2003.

BALL, B.C.; SCOTT, A. & PARKER, J.P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland, *Soil Till. Res.*, 53:29–39, 1999.

BODELIER, P.L.E. & LAANBROEK, H.J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and Sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 47:265-277, 2004.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Sumário de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases do efeito estufa, 2010.

BREMMER, J.M. Sources of nitrous oxide in soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49:7-16, 1997.

BUYANOVSKY, G. A. & WAGNER, G.H. Soil respiration and carbon dynamics in parallel native and cultivated ecosystems. In: Lal R, Kimble J, Levine E & Stewart BA (Eds) *Soils and Global Change*. CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A. 1995. p. 209-217.

CAMPOS, B.C.; AMADO, T.S.C.; TORNQUIST, C.G.; NICOLOSO, R.S. & FIORIN, J.E. Long-term C-CO₂ emissions and carbon crop residue mineralization in an oxisol under different tillage and crop rotation systems. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:819-832, 2011.

CARVALHO, A.M.; BUSTAMANTE, M.M.C.; KOZOVITS, A.R.; MIRANDA, L. N.; VIVALDI, L.J. & SOUSA, D.M. Emissão de óxidos de nitrogênio associada à aplicação de uréia sob plantio convencional e direto. *Pesq. agropec. bras.* 41:679-685, 2006.

CESCHIA, E.; BÉZIAT, P.; DEJOUX, J.F.; AUBINET, M.; BERNHOFER, C.; BODSON, B.; BUCHMANN, N.; CARRARA, A.; CELLIER, P.; DI TOMASI, P.; ELBERS, J.A.; EUGSTER, W.; GRÜNWALD, T.; JACOB, C.M.J.; JANS, W.W.P.; JONES, M.; KUTSCH, W.; LANIGAN, G.; MAGLIULO, E.; MARLOIE, O.; MOORS, E.J.; MOUREAUX C.; OLIOLO, A.; OSBORNE, B.; SANZ, M.J.; SAUNDERS, M.; SMITH, P.; SOEGAARD, H. & WATTENBACH, M. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 139:363-383, 2010.

CIAMPITTI, I.A.; CIARLO, E.A. & CONTI, M.E. Nitrous oxide emissions from soil du soybean[*Glycine max* (L.) Merrill] crop phenological stages and stubbles decomposition period. *Biol. Fertil. Soils*, 44:581-588, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acesso em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>. Data de acesso: Mai.17, 2012.

DALAL, R. C.; WANG, W.; ROBERTSON, G. F. & PARTON, W.J. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Aust. J. Soil Res.*, 41:165-195, 2003.

DAVIDSON, E. A.; KELLER, M.; ERICKSON, H.E.; VERCHOT, L.V. & VELDKAMP, E. Testing a conceptual model of soils emissions of nitrous and nitric oxides. *Biol. Sci.*, 50:667-680, 2000.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 year. *Soil Till. Res.*, 81:87-95, 2005.

DOBBIE, K.E. & SMITH, K.A. Comparison of CH₄ oxidation rates in woodland, arable and set aside soils. *Soil Biol. Biochem.*, 28:1357-1365, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa Solos), 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa Solos), 2006. 301p.

FLESSA, H.; RUSER, R.; DÖRSCH, P.; KAMP, T.; JIMENEZ, M.A.; MUNCH, J.C. & BEESE, F. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 91:175–189, 2002.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M. & ZUBERER, D.A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. *Soil Till. Res.*, 34:41-60, 1995.

GOMES, J. Emissão de Gases do Efeito Estufa e Mitigação do Potencial de Aquecimento Global por Sistemas Conservacionistas de Manejo do Solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 127p. (Tese de doutorado).

GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F. S.; PICCOLO, M. C.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, C. B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. *Soil. Till. Res.*, 106:36-44, 2009.

GREGORICH, E.G.; ROCHETTE, P.; HOPKINS, D.W.; MCKIMA, U. F. & ST-GEORGE, P. Tillage-induced environmental conditions in soil and substrate limitation determine biogenic gas production. *Soil Biology & Biochemistry*, 38:2614–2628, 2006.

HANSEN, S.; MAEHLUM, J.E. & BAKKEN, L.R. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biol. Biochem.*, 25:621-630, 1993.

HANSON, P.J.; EDWARDS, N.T.; GARTEN, C.T. & ANDREWS, J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48:115–146, 2000.

HUTSCH, B. W. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrite and organic manure with respect to soil pH. *Biology and fertility of soils*, Berlin, 28:27-35, 1998.

HUTSCH, B.W.; WEBSTER, C.P. & POWLSON, D.S. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the broadbalk wheat experiment. *Soil Biol. Biochem.*, 25:1307-1315, 1993.

IAPAR. Cartas Climáticas do Estado do Paraná 1984. IAPAR, Londrina, 1984. 49 p.

JABRO, J.D.; SAINJU, U.; STEVENS, W.B. & EVANS, R.G. Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops. *Journal of Environmental Management*, 88:1478–1484, 2008.

- JANG, I.; LEE, S. HONG, J. & KANG, H. Methane oxidation rates in forest soils and their controlling variables: a review and a case study in Korea. *Ecol Res.*, 21:849–854, 2006.
- JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P. dos; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. & ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nut. Cycl. Agr.*, 82:161-173, 2008.
- KESSAVALOU, A.; MOSIER, A.R.; DORAN, J.W.; DRIJBER, R.A.; LYON, D.J. & HEINEMEYER, O. Fluxes of Carbon Dioxide, Nitrous Oxide, and Methane in Grass Sod and Winter Wheat-Fallow Tillage Management. *J. Environ. Qual.* 27:1094-1104, 1998.
- KHALIL, M.I. & BAGGS, E.M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. *Soil Biol. Biochem.*, 37,1785–1794, 2005.
- LAL, R. Carbon emission from farm operations. *Environment International* 30:981-990, 2004.
- LE MER, J. & ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.* 37:25–50, 2001.
- LINN, D.M. & DORAN, J.W. Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Non tilled Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1267-1272, 1984.
- MCSWINEY, C.P. & ROBERTSON, G.P. Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. *Global Change Biol.*, 11:1712–1719, 2005.
- METAY, A.; OLIVER, R.; SCOPEL, E.; DOUZET, J.; MOREIRA, J.A.A.; MARAUX, F., FEIGL, B.J. & FELLER, C. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). *Geoderma.* 141:78–88, 2007.
- MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F. & DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. *Tópicos em Ci. Solo*, 3:209–248, 2003.
- MILLAR, N. & BAGGS, E.M. Chemical composition, or quality, of agroforestry residues influences N₂O emissions after their addition to soil. *Soil Biol. Biochem.*, 36:935–943, 2005.
- MINEROPAR. Mapa Geológico do Estado do Paraná . Mineropar - Minerais do Paraná, Secretaria de Estado da Indústria, do Comércio e Assuntos do Mercosul, Curitiba, 2001.
- MOLIN, R. Subsistemas de produção em plantio direto: explorando alternativas econômicas rentáveis para o inverno. 1 ed. Castro, PR: Fundação ABC, Kugler Artes Gráficas, 2008. 104p.
- MOSIER, A.R. Chamber and isotope techniques. In: ANDREAE, M.O. & SCHIMEL, D.S., ed. Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop. Berlin, Wiley, p.175-187, 1989.

MOSIER, A.R.; DUXBURY, J.M.; FRENEY, J.R.; HEINEMEYER, O. & MINAMI, K. Nitrous oxide from agricultural fields: assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil*, 181:95–108, 1996.

MOSIER, A.R.; HALVORSON, A.D.; REULE, C.A.; LIU, X.J. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in Northeastern Colorado. *J. Environ. Qual.*, 35:1584–1598, 2006.

OMONODE, R.A.; VYN, T.J.; SMITH, D.R.; HEGYMEGI, P. & GÁL, A. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations. *Soil. Till. Res.*, 95:182–195, 2007.

PARKIN, T.; MOSIER, A.; SMITH, J.; VENTEREA, R.; JOHNSON, J.; REICOSKY, D.; DOYLE, G.; MCCARTY, G. & BAKER, J. Chamber-based trace gas flux measurement protocol. USDA-ARS GRACEnet, 2003.

PARKIN, T.B. & KASPER, T.C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: implication for estimating soil carbon loss. *Soil Sci. Am. J.*, 67:1763–1772, 2003.

RAICH, J. W. & TUFEKCIOGLU, A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48:71–90, 2000.

ROBERTSON, G. P; PAUL, E. A; HARWOOD, R. R. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radioactive forcing of the atmosphere. *Science*, 289: 1922–1925, 2000.

ROCHETTE, P. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil. Till. Res.*, 101:97–100, 2008.

RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, J.C. MUNCHA, J.C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biol. Biochem.*, 38 263–274, 2006.

SAINJU, U.M.; SENWO, Z.N.; NYAKATAWA, E.Z.; TAZISONG, I.A. & CHANDRA REDDY, K. Soil carbon and nitrogen sequestration as affected by long-term tillage, cropping systems, and nitrogen fertilizer sources. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 27:234–240, 2008.

SANTOS, N. Z.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V. & PIVA, J. T. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil Till. Res.*, 111: 208–218, 2011.

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A. & PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241:155–176, 2002.

SIX, J.; OGLE, S.M.; JAY BREIDT, F.; CONANT, R.T.; MOSIER, A.R. & PAUSTIAN, K. *Global Change Biol.*, 10:155–160, 2004.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J. & REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 54:779–791, 2003.

SMITH, P., D. MARTINO, Z. CAI, D. GWARY, H. JANZEN, P. KUMAR, B. MCCARL, S. OGLE, F. O'MARA, C. RICE, B. SCHOLLES, O. SIROTENKO, 2007: Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. p. 497-540.

TEMPLETON, A.S.; CHU, K.H.; ALVAREZ-COHEN, L.; CONRAD, M.E. Variable carbon isotope fractionation expressed by aerobic CH₄-oxidizing bacteria. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 70: 1739–1752, 2006.

TOPP, E. & PATTEY, E. Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Can. J. Soil Sci.*, 77:167–178, 1997.

USSIRI, D.A.N.; LAL, R. & JARECKI, M.K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil. Till. Res.*, 104:247–255, 2009.

VAHDAT, E.; NOURBAKHSH, F. & BASIRI, M. Lignin content of range plant residues controls N mineralization in soil. *Eur. J. Soil Biol.* 47:243-246, 2011.

VENTEREA, R.T.; BURGER, M. & SPOKAS, K.A. Nitrogen Oxide and Methane Emissions under Varying Tillage and Fertilizer Management. *J. Environ. Qual.*, 34:1467–1477, 2005.

WAGNER-RIDDLE, C.; THURTELL, G.W.; KIDD, G.K.; BEAUCHAMP, E.G. & SWEETMAN, R. Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 30 months. *Can. J. Soil Sci.* 77: 135–144, 1997.

WEIER, K.L. N₂O and CH₄ emission and CH₄ consumption in a sugarcane soil after variation in nitrogen and water application. *Soil Biol. Biochem.*, 31:1931–1941, 1999.

WEST, T.O. & MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 91:217–232, 2002.

WILLISON, T.W.; WEBSTER, C.P.; GOULDING, K.W. T. & POWLSON, D. S. Methane oxidation in temperate soils: effects of land use and the chemical form of nitrogen fertilizer. *Chemosphere*, 30:539-546, 1995.

YANG, L. & CAI, Z. The effect of growing soybean (*Glycine max. L.*) on N₂O emission from soil. *Soil Biology & Biochemistry* 37:1205–1209, 2005.

ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; VIEIRA, F.C.B.; GOMES, J. & TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in South Brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1653-1665, 2010.

CONCLUSÃO GERAL

O sistema Al-Mi apresentou o maior sequestro de C e acúmulo de N, menor emissão de N_2O , juntamente com o sistema Tr-So, maior oxidação de CH_4 e maior emissão de CO_2 . O elevado sequestro de C e acúmulo de N são atribuídos à elevada adição de C e N pelas raízes, devido os ciclos de corte e crescimento da parte aérea. Tanto a baixa emissão de N_2O , como a maior oxidação de CH_4 verificadas neste sistema devem ser em virtude da elevada macroporosidade do solo, que permite uma maior aeração, dificultando a ocorrência de desnitrificação e favorecendo a atividade dos microorganismos metanotróficos. A elevada emissão de CO_2 verificada foi atribuída aos maiores estoques de C e N, os quais são nutrientes fundamentais para a atividade microbiológica.

Maiores emissões de N_2O foram verificadas no sistema Az-Mi-Az-So, o que deve ter sido em função da menor macroporosidade e maior microporosidade, em razão dos 2-3 cortes da parte aérea do azevém serem efetuados com o uso de roçadeira acoplada ao trator, que deve ter exercido um efeito compactador sobre o solo, fazendo com que em determinadas situações haja a ocorrência de desnitrificação, o principal processo de produção de N_2O .

O sistema Az-Mi-Az-So apresenta o maior potencial de aquecimento global, em virtude dos elevados custos associado às operações agrícolas e insumos e a elevada emissão de N_2O verificada, por outro lado, o sistema Al-Mi, devido à baixa emissão de N_2O e elevado sequestro de C, apresenta o menor potencial de aquecimento global, apresentando então o maior potencial de mitigação do aquecimento global.

APÊNDICES

Apêndice 1. Dados originais de concentração de C e N (g kg^{-1}), relação C:N e densidade do solo de cada camada de cada tratamento.

Tratamento	Camada	Carbono					Nitrogênio					Relação C:N					Densidade				
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média
	--cm--	-----g kg ⁻¹ solo-----										-----Mg m ⁻¹ -----									
Tri-So	0-5	33,4	36,7	38,9	31,0	35,0	2,62	2,61	3,03	2,44	2,67	12,8	14,1	12,9	12,7	13,1	1,18	0,81	0,93	0,95	0,97
	5-10	24,8	29,5	25,1	23,4	25,6	1,76	2,20	1,82	1,71	1,87	14,1	13,4	13,8	13,7	13,7	1,06	1,09	1,14	1,29	1,15
	10-20	22,5	24,9	20,6	18,1	21,5	1,40	1,46	1,24	1,10	1,29	16,1	17,1	16,6	16,5	16,5	1,31	1,27	1,26	1,29	1,28
	20-30	18,6	20,3	19,8	16,6	18,8	1,09	1,12	1,10	0,94	1,06	17,1	18,2	18,0	17,7	17,7	1,18	1,16	1,26	1,17	1,19
	30-45	15,0	17,2	14,7	13,5	15,0	0,87	0,91	0,79	0,76	0,82	17,4	19,0	18,6	17,8	18,1	1,11	1,07	1,09	1,01	1,07
	45-60	13,6	14,4	12,7	12,2	13,2	0,77	0,72	0,64	0,62	0,68	17,8	20,0	19,8	19,6	19,2	1,04	0,99	1,08	1,03	1,04
	60-80	11,7	12,4	10,8	9,8	11,1	0,66	0,54	0,51	0,49	0,55	17,8	23,0	21,2	20,0	20,4	1,06	1,04	1,06	1,03	1,05
	80-100	10,9	11,0	9,9	9,7	10,3	0,61	0,46	0,44	0,44	0,48	18,0	24,2	22,8	22,2	21,7	0,98	1,01	1,16	1,13	1,07
Av-Mi-Tr-So	0-5	35,9	36,3	35,7	35,9	35,9	2,76	2,71	2,68	2,91	2,76	13,0	13,4	13,3	12,4	13,0	1,12	1,13	0,93	0,89	1,02
	5-10	25,7	24,3	25,1	26,4	25,3	1,09	1,64	1,62	2,09	1,60	23,5	14,8	15,5	12,7	16,6	1,22	1,16	1,29	1,24	1,23
	10-20	20,3	22,1	18,8	20,3	20,3	1,29	1,39	1,15	1,46	1,32	15,8	16,0	16,4	13,9	15,5	1,39	1,24	1,39	1,32	1,33
	20-30	19,1	18,8	18,3	19,1	18,8	1,20	1,05	1,05	1,18	1,11	16,0	18,0	17,5	16,2	16,9	1,20	1,31	1,33	1,21	1,26
	30-45	15,4	15,8	15,2	14,0	15,1	0,92	0,86	0,90	0,81	0,86	16,9	18,5	16,9	17,4	17,4	1,07	1,08	1,23	1,06	1,11
	45-60	13,0	13,7	12,2	13,2	13,0	0,77	0,69	0,67	0,73	0,71	16,9	19,8	18,3	18,2	18,3	1,03	1,00	1,08	1,03	1,04
	60-80	11,4	11,6	10,7	10,5	11,0	0,63	0,54	0,54	0,64	0,58	18,3	21,7	19,8	16,4	19,0	1,06	1,05	1,07	1,12	1,07
	80-100	10,1	10,2	9,1	9,8	9,7	0,56	0,46	0,43	0,49	0,48	17,9	22,3	21,4	20,0	20,4	1,12	1,02	1,13	1,05	1,08
Er-Mi-Tr-So	0-5	32,3	34,6	35,7	30,7	33,3	2,57	2,65	2,73	2,48	2,60	12,6	13,0	13,1	12,4	12,7	0,92	1,00	0,96	0,95	0,96
	5-10	25,3	26,2	24,0	21,5	24,2	1,93	1,88	1,67	1,70	1,79	13,1	14,0	14,4	12,7	13,5	1,18	1,06	1,21	1,22	1,17
	10-20	21,7	20,8	21,6	17,3	20,3	1,37	1,32	1,43	1,15	1,31	15,8	15,8	15,1	15,0	15,4	1,26	1,29	1,30	1,31	1,29
	20-30	19,6	19,8	19,9	15,8	18,7	1,16	1,12	1,16	1,05	1,11	17,0	17,7	17,2	15,2	16,7	1,27	1,32	1,26	1,16	1,25
	30-45	16,8	16,9	15,7	12,5	15,4	8,46	1,02	0,85	0,79	2,77	2,0	16,6	18,5	16,0	13,2	1,06	0,99	1,02	1,10	1,04
	45-60	13,7	15,2	13,1	11,1	13,2	0,83	0,84	0,68	0,66	0,75	16,6	18,1	19,4	16,8	17,7	1,14	1,02	1,16	1,08	1,10
	60-80	11,9	12,3	11,4	9,6	11,2	0,69	0,57	0,54	0,52	0,57	17,4	21,8	21,4	18,4	19,7	1,01	0,98	1,17	1,02	1,05
	80-100	10,2	11,4	9,6	8,7	9,9	0,60	0,61	0,41	0,52	0,53	17,1	18,8	23,4	16,8	19,0	1,03	1,05	1,16	1,04	1,07
Er-Mi-Av-So-Tr-So	0-5	36,9	37,0	36,2	33,5	35,8	2,99	3,17	2,85	2,78	2,94	12,3	11,7	12,7	12,1	12,2	0,96	0,91	0,88	0,97	0,93
	5-10	23,7	28,0	26,9	24,6	25,7	1,73	2,12	1,96	1,90	1,92	13,7	13,2	13,7	13,0	13,3	1,08	1,11	1,10	1,12	1,10
	10-20	21,2	22,3	21,3	19,8	21,1	1,32	1,31	1,32	1,38	1,33	16,1	17,1	16,2	14,4	15,9	1,34	1,26	1,33	1,33	1,32
	20-30	19,1	19,6	19,2	17,5	18,8	1,17	1,03	1,10	1,12	1,10	16,3	19,1	17,6	15,7	17,1	1,23	1,14	1,22	1,24	1,21
	30-45	15,3	16,5	15,4	15,2	15,6	0,89	0,87	0,83	0,98	0,89	17,2	19,1	18,6	15,6	17,6	1,01	1,12	1,09	1,13	1,09
	45-60	13,3	13,4	13,7	12,4	13,2	0,76	0,64	0,72	0,76	0,71	17,5	21,1	19,0	16,4	18,5	1,03	1,04	1,04	1,12	1,06
	60-80	11,9	11,6	9,9	10,5	10,9	0,65	0,52	0,40	0,61	0,54	18,4	22,3	24,8	17,4	20,7	1,05	1,02	1,09	1,07	1,06
	80-100	10,1	11,0	10,1	9,7	10,2	0,50	0,46	0,42	0,55	0,47	20,4	23,9	24,3	17,8	21,5	0,96	1,09	1,07	1,10	1,06

...Continua na próxima página

...Continuação do apêndice 1

Tratamento	Camada	Carbono					Nitrogênio					Relação C:N					Densidade				
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Média
	---cm--	-----g kg ⁻¹ solo-----															Mg m ⁻³				
Az-Mi-Az-So	0-5	38,3	37,1	34,0	31,4	35,2	2,99	2,81	2,60	2,64	2,75	12,8	13,2	13,1	11,9	12,7	0,94	0,97	0,84	0,86	0,90
	5-10	27,3	24,3	27,1	22,5	25,2	1,96	2,03	1,89	1,76	1,90	13,9	12,0	14,4	12,8	13,2	1,34	1,22	1,37	1,22	1,29
	10-20	21,6	23,2	21,0	17,4	20,7	1,31	1,37	1,17	1,21	1,26	16,5	17,0	18,0	14,4	16,4	1,35	1,28	1,34	1,31	1,32
	20-30	19,7	18,9	18,6	16,2	18,3	1,11	1,05	0,88	1,03	1,01	17,7	18,0	21,1	15,7	18,1	1,34	1,30	1,24	1,22	1,28
	30-45	16,9	15,7	15,6	13,5	15,4	1,00	0,84	0,81	0,81	0,86	17,0	18,8	19,3	16,8	17,9	1,04	0,90	1,03	1,01	0,99
	45-60	14,5	13,5	12,4	10,9	12,8	0,83	0,80	0,62	0,71	0,73	17,5	17,0	20,2	15,4	17,5	1,08	1,07	1,07	1,09	1,08
	60-80	12,2	11,5	10,7	9,8	11,0	0,66	0,49	0,47	0,55	0,54	18,5	23,4	22,8	17,8	20,6	1,06	1,06	1,00	1,07	1,05
	80-100	10,8	10,3	10,1	8,7	9,9	0,56	0,42	0,42	0,51	0,47	19,4	24,7	24,0	17,1	21,3	0,88	1,09	1,10	1,10	1,04
Al-Mi	0-5	38,5	38,2	41,1	34,4	38,0	3,17	3,07	3,45	2,69	3,03	12,2	12,4	11,9	12,8	12,3	1,03	0,88	0,88	0,80	0,90
	5-10	27,2	28,3	28,5	29,4	28,3	2,00	2,07	2,20	2,08	2,08	13,6	13,7	13,0	14,1	13,6	1,05	1,16	1,11	1,18	1,13
	10-20	22,4	23,1	24,3	21,5	22,8	1,40	1,40	1,62	1,46	1,46	16,0	16,5	15,0	14,8	15,5	1,27	1,29	1,27	1,24	1,27
	20-30	19,8	21,1	19,5	20,6	20,2	1,15	1,16	1,03	1,29	1,15	17,2	18,2	18,9	16,0	17,5	1,17	1,21	1,17	1,26	1,20
	30-45	16,3	16,3	16,8	15,2	16,1	0,93	0,87	0,94	0,75	0,87	17,5	18,8	17,9	20,4	18,6	1,00	0,93	1,00	1,11	1,01
	45-60	14,0	13,8	13,2	12,4	13,3	0,80	0,69	0,72	0,72	0,72	17,6	20,2	18,4	17,3	18,3	1,04	1,06	1,00	1,02	1,03
	60-80	11,2	12,2	12,1	11,0	11,6	0,59	0,58	0,62	0,70	0,62	19,1	21,0	19,7	15,7	18,8	1,01	1,12	1,05	1,02	1,05
	80-100	10,4	11,4	10,5	10,1	10,6	0,53	0,52	0,51	0,54	0,52	19,7	22,2	20,9	18,7	20,3	1,09	1,07	0,98	1,04	1,05

Apêndice 02. Dados originais de emissão de N₂O de cada coleta e tratamento.

Data	Nº Coleta	Tr-So				Av-Mi-Tr-So				Er-Mi-Tr-So				Az-Mi-Az-So				Al-Mi			
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média
12/12/10	01	8,4	4,9	1,5	4,9	-23,8	-14,3	-4,7	-14,3	3,7	1,6	2,6	2,6	8,6	7,0	7,8	7,8	21,2	30,4	26,2	25,9
31/01/10	02	0,4	9,5	6,2	5,3	10,2	8,4	12,1	10,2	18,4	19,2	15,0	17,5	29,3	138,1	186,6	118,0	17,1	27,0	18,1	20,8
20/02/11	03	59,9	70,4	80,9	70,4	90,6	82,6	86,6	86,6	123,0	116,3	119,6	119,7	107,4	95,3	115,8	106,2	5,8	7,1	4,5	5,8
01/05/11	04	7,5	6,9	2,8	5,7	-3,9	-2,7	-1,5	-2,7	6,7	13,1	4,3	8,0	13,0	19,6	6,3	13,0	8,3	11,8	8,7	9,6
19/05/11	05	4,0	8,5	6,3	6,3	16,9	15,3	16,1	16,1	8,2	10,4	9,3	9,3	11,8	8,8	15,4	12,0	2,7	0,7	4,1	2,5
29/05/11	06	27,8	6,5	17,2	17,2	17,0	5,9	10,3	11,1	10,7	12,2	13,7	12,2	-7,1	-4,3	-1,4	-4,3	18,1	10,0	26,1	18,1
16/06/11	07	22,3	31,8	19,7	24,6	16,5	7,6	6,0	10,0	2,9	5,7	2,0	3,5	2,2	9,9	5,7	6,0	3,9	3,5	10,1	7,2
03/07/11	08	3,4	0,9	7,6	4,0	52,6	76,2	29,1	52,6	53,9	28,4	3,0	28,4	30,1	-4,6	-16,7	2,9	7,2	8,8	5,5	7,2
12/07/11	09	13,5	6,0	0,9	6,8	13,7	24,9	2,6	13,7	6,7	4,9	9,8	7,1	4,3	10,0	0,2	4,8	4,6	3,7	3,5	3,9
14/07/11	10	9,6	9,8	9,7	9,7	14,9	24,5	8,1	15,8	5,7	4,3	5,4	5,1	4,2	1,6	6,7	4,2	0,7	7,1	2,9	3,6
16/07/11	11	2,1	5,4	8,7	5,4	12,1	12,2	12,2	12,2	3,8	2,7	3,2	3,3	5,0	5,9	4,0	5,0	0,8	10,4	5,6	5,6
18/07/11	12	13,2	18,8	6,2	12,7	26,6	25,4	24,3	25,4	35,5	55,5	63,1	51,3	21,8	24,4	26,9	24,4	40,6	24,2	46,8	37,2
21/07/11	13	24,7	66,4	32,9	41,3	19,2	24,9	30,6	24,9	23,1	19,8	8,2	17,0	7,2	54,2	1,4	20,9	24,3	22,4	20,5	22,4
27/07/11	14	63,0	45,7	80,4	63,0	8,1	28,7	18,4	18,4	13,1	44,5	28,8	28,8	11,8	11,8	11,8	11,8	4,8	7,7	6,3	6,3
28/08/11	15	9,3	4,7	5,6	6,5	16,3	5,0	3,6	8,3	9,5	22,0	5,4	12,3	12,5	11,4	10,3	11,4	-0,3	-16,9	-8,6	-8,6
30/08/11	16	2,9	4,0	0,8	2,6	3,3	1,9	1,8	2,4	7,8	6,9	1,6	5,5	2,5	3,1	3,8	3,1	3,5	3,0	2,0	2,8
02/09/11	17	5,5	4,2	12,1	7,3	5,9	4,8	7,1	5,9	5,0	9,4	6,3	6,9	2,3	12,9	1,8	5,7	4,7	4,2	1,3	3,4
04/09/11	18	33,1	12,6	22,4	22,7	11,4	12,4	10,5	11,4	10,8	42,0	13,6	22,1	20,0	19,6	19,6	19,7	-7,3	-10,1	-12,9	-10,1
08/09/11	19	19,2	33,3	5,2	19,2	43,3	39,7	77,2	53,4	120,4	99,7	93,7	104,6	93,4	25,0	36,1	51,5	2,3	-7,1	11,6	2,3
13/09/11	20	3,4	2,5	2,9	2,9	39,3	14,3	26,8	26,8	58,9	61,4	65,4	61,9	33,4	21,3	29,7	28,1	10,0	5,4	14,7	10,0
19/09/11	21	-16,7	-2,8	-2,8	-7,5	6,9	17,7	12,3	12,3	8,0	24,7	16,3	16,3	-0,3	35,1	17,4	17,4	5,0	26,8	15,9	15,9
25/09/11	22	4,4	2,0	4,1	3,5	13,1	1,5	9,3	8,0	26,0	16,9	19,6	20,8	15,6	18,7	12,6	15,6	18,1	30,7	38,0	28,9
02/10/11	23	11,4	11,2	24,5	15,7	110,8	40,9	70,0	73,9	99,5	82,3	215,9	132,6	197,3	110,9	84,3	130,8	114,9	207,5	147,7	156,7
11/10/11	24	10,8	16,0	7,6	11,5	154,9	29,2	139,6	107,9	78,5	67,7	61,9	69,4	167,7	134,1	63,9	121,9	119,8	136,1	96,4	117,4
13/10/11	25	7,3	3,0	5,2	5,2	58,0	40,0	50,2	49,4	48,7	32,1	102,2	61,0	36,4	56,1	14,5	35,7	70,5	93,4	80,8	81,5
15/10/11	26	-5,2	-6,4	-7,6	-6,4	265,5	157,7	263,4	228,9	342,9	320,3	326,1	329,8	273,4	377,4	319,8	323,5	153,7	363,9	325,6	281,1
18/10/11	27	21,4	4,3	4,5	10,1	122,7	165,2	161,1	149,7	131,3	248,2	160,2	179,9	147,3	94,6	121,0	120,9	110,8	340,4	213,7	221,6
01/10/11	28	2,9	6,2	9,4	6,1	35,6	175,7	64,3	91,9	45,9	176,2	115,9	112,6	18,5	50,3	16,2	28,3	45,4	89,7	60,2	65,1
25/10/11	29	26,8	87,0	72,5	62,1	22,9	96,2	44,2	54,4	26,4	82,2	77,2	61,9	32,6	69,8	51,2	51,2	69,1	193,6	126,5	129,7
09/11/11	30	128,6	118,8	26,0	91,2	7,2	36,3	176,8	73,4	33,8	68,6	37,4	46,6	88,6	-6,3	-13,9	22,8	16,0	96,0	76,5	62,8
30/11/11	31	9,1	6,3	3,5	6,3	99,7	195,9	3,6	99,7	21,5	22,0	22,5	22,0	283,6	40,6	18,1	114,1	34,0	30,0	43,1	35,7
12/12/11	32	9,0	7,0	5,0	7,0	10,5	9,6	6,9	9,0	5,0	12,4	3,5	7,0	15,0	17,7	12,3	15,0	2,6	17,9	3,4	8,0

Apêndice 03. Dados originais de emissão de CH₄ de cada coleta e tratamento.

Data	Nº Coleta	Tr-So				Av-Mi-Tr-So				Er-Mi-Tr-So				Az-Mi-Az-So				Al-Mi			
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média
12/12/10	01	-17,9	-18,0	-17,8	-17,9	-9,5	-11,1	-12,8	-11,1	-18,7	-18,4	-18,9	-18,7	-14,6	-29,6	-12,1	-18,8	-11,0	-16,8	-22,6	-16,8
31/01/10	02	-11,0	-15,4	-6,6	-11,0	-11,1	-5,9	-24,2	-13,7	-16,7	-6,3	-11,7	-11,6	-13,0	-10,0	-14,7	-12,5	-5,8	-6,8	-6,1	-6,3
20/02/11	03	-2,2	-7,0	-7,1	-5,4	-10,8	-10,4	-10,1	-10,4	-8,9	-11,2	-13,6	-11,2	-9,3	-5,0	-11,5	-8,6	-5,4	-20,1	-8,8	-11,4
01/05/11	04	-26,7	-13,2	-14,6	-18,2	-5,3	-16,8	-28,4	-16,8	-36,5	-20,9	-5,2	-20,9	3,9	2,6	5,2	3,9	-20,3	-13,5	-20,6	-18,1
19/05/11	05	-7,5	-3,7	-5,6	-5,6	-3,4	-6,7	-7,1	-5,7	-15,0	-1,1	-3,4	-6,5	-19,1	-14,4	-9,7	-14,4	-10,9	-12,4	-14,2	-12,5
29/05/11	06	-41,1	-13,0	-69,3	-41,1	-2,2	-10,0	-6,1	-6,1	-13,0	-11,1	-14,9	-13,0	-15,5	-18,9	-17,2	-17,2	-61,1	-3,4	-32,2	-32,2
16/06/11	07	-0,4	-9,9	-5,1	-5,1	59,4	50,3	68,4	59,4	-5,8	-5,1	-8,8	-6,6	-7,7	-4,2	-0,7	-4,2	-7,0	-2,9	-3,0	-4,3
03/07/11	08	-14,7	-15,3	-0,8	-10,3	9,0	9,9	8,0	9,0	-4,8	-4,2	-5,4	-4,8	-1,1	-17,6	-43,6	-20,8	-17,2	-16,3	-15,3	-16,3
12/07/11	09	-22,5	-32,4	-12,6	-22,5	-36,1	-14,2	-2,6	-17,6	-28,4	-34,3	-22,6	-28,4	-14,0	-7,4	-33,2	-18,2	-28,3	-6,7	-3,0	-12,7
14/07/11	10	-9,8	-7,8	-11,8	-9,8	-5,2	-14,2	-11,1	-10,2	-12,0	-4,1	-7,4	-7,8	-22,3	-22,7	-21,8	-22,3	-9,7	-10,4	-22,5	-14,2
16/07/11	11	-22,4	-13,8	-5,1	-13,8	-3,4	-8,9	-30,5	-14,3	-22,3	-19,0	-25,7	-22,3	-9,8	-9,9	-10,0	-9,9	-12,4	-14,1	-10,6	-12,4
18/07/11	12	-4,2	-6,4	-1,9	-4,2	-4,9	-6,4	-3,4	-4,9	14,0	23,7	18,9	18,9	3,0	2,3	3,8	3,0	-14,0	-2,3	-8,2	-8,2
21/07/11	13	41,0	3,8	22,4	22,4	-39,4	-53,9	-24,9	-39,4	58,4	25,3	65,3	49,6	-57,8	-83,7	-32,0	-57,8	16,2	9,0	23,4	16,2
27/07/11	14	-11,6	-28,1	-1,8	-13,9	6,0	1,9	3,9	3,9	72,8	91,1	1,8	55,3	-11,4	-11,8	-11,0	-11,4	-14,6	-16,0	-13,2	-14,6
28/08/11	15	44,8	95,6	146,3	95,6	13,7	81,0	68,8	54,5	14,1	37,4	25,8	25,8	-53,4	-10,5	-52,5	-38,8	-26,8	-17,2	-7,7	-17,2
30/08/11	16	3,0	4,8	1,1	3,0	3,7	5,0	6,3	5,0	-6,6	-4,2	-1,9	-4,2	-6,3	-4,5	-8,2	-6,3	40,2	37,4	38,8	38,8
02/09/11	17	-6,9	-19,6	-13,2	-13,2	-92,5	-11,1	-51,8	-51,8	-7,0	-3,1	-10,9	-7,0	-1,5	-3,4	-1,9	-2,3	-7,7	-5,4	-8,3	-7,1
04/09/11	18	-79,9	-110,7	-49,1	-79,9	-33,5	-66,3	-0,7	-33,5	-75,8	-18,8	-47,3	-47,3	-83,3	53,6	-14,8	-14,8	-97,3	-82,6	-67,9	-82,6
08/09/11	19	-3,0	-4,1	-5,2	-4,1	-11,6	-14,5	-24,4	-16,8	-6,4	-80,5	-56,3	-47,7	-8,2	-2,6	-30,0	-13,6	-21,4	-30,6	-12,2	-21,4
13/09/11	20	-6,8	-19,8	-13,3	-13,3	58,9	15,2	37,0	37,0	4,6	1,1	8,0	4,6	27,7	30,0	32,4	30,0	-26,3	-23,4	-29,3	-26,3
19/09/11	21	-85,3	-22,1	-22,1	-43,2	-10,6	13,7	1,6	1,6	3,3	-30,9	-13,8	-13,8	-56,1	-39,6	-23,2	-39,6	-122,6	-54,3	-88,4	-88,4
25/09/11	22	21,1	22,9	19,4	21,1	5,4	1,9	8,9	5,4	-5,5	-8,2	-9,7	-7,8	-11,7	-6,0	-4,1	-7,3	-5,6	-5,2	-6,0	-5,6
02/10/11	23	0,4	-9,6	-15,8	-8,4	4,4	-5,5	-1,5	-0,9	-1,1	-5,2	-1,5	-2,6	-13,7	-15,5	-4,8	-11,3	-5,9	-7,0	-2,9	-5,3
11/10/11	24	-17,4	-5,2	-8,5	-10,4	14,5	-2,2	-9,6	0,9	-7,1	-1,9	-0,4	-3,1	0,7	5,6	-4,8	0,5	-5,6	-7,8	-1,5	-4,9
13/10/11	25	-16,8	-10,9	-12,3	-13,3	-9,4	-6,4	3,7	-4,0	-2,6	-11,6	-57,4	-23,9	-5,6	-15,3	-44,0	-21,7	-17,2	-14,6	-15,9	-16,8
15/10/11	26	-8,6	-6,7	-11,2	-8,8	6,4	1,1	1,9	3,1	-3,7	-3,7	-13,1	-6,9	2,6	3,4	1,9	2,6	-0,8	-3,4	-1,5	-1,9
18/10/11	27	22,9	26,6	19,3	22,9	-19,7	-22,6	-18,6	-20,3	-9,1	-39,5	-4,1	-17,6	-15,4	-9,8	-20,9	-15,4	-9,5	0,4	-99,3	-36,1
01/10/11	28	-23,0	-22,3	-21,5	-22,3	-1,9	-3,0	-4,0	-2,9	-1,9	-25,9	-12,1	-13,3	9,7	10,0	10,3	10,0	-1,1	-27,3	-12,8	-13,7
25/10/11	29	-8,2	-1,1	-4,7	-4,7	-1,1	-11,6	-0,7	-4,5	-10,8	-4,1	-3,3	-6,1	-2,2	-1,9	-7,0	-3,7	-1,5	-9,6	-17,8	-9,6
09/11/11	30	-6,8	-10,4	-3,2	-6,8	-22,8	-6,5	5,7	-7,9	-4,1	-8,4	-12,9	-8,4	-4,4	-8,6	-24,3	-12,4	-25,0	-10,5	-17,8	-17,8
30/11/11	31	-5,1	-4,8	-4,4	-4,8	-98,6	-56,0	-13,4	-56,0	-5,9	-14,0	-19,3	-13,1	-14,8	-13,9	-15,6	-14,8	-24,8	-1,5	-21,8	-16,0
12/12/11	32	-30,4	-19,8	-19,8	-23,3	-30,6	-5,9	-55,4	-30,6	-3,7	-14,3	-19,1	-12,3	-11,7	-17,4	-23,1	-17,4	-11,4	-22,7	-34,1	-22,7

Apêndice 4. Dados originais de emissão de CO₂ de cada coleta e tratamento.

Data	N° Coleta	Tr-So				Av-Mi-Tr-So				Er-Mi-Tr-So				Az-Mi-Az-So				Al-Mi			
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média
12/12/10	01	238,8	223,5	281,1	247,8	271,6	151,7	247,0	223,4	252,0	322,1	365,9	313,3	294,8	321,2	355,4	323,8	381,4	256,1	741,6	459,7
31/01/10	02	574,2	454,9	583,9	537,7	464,8	530,8	373,6	456,4	518,9	591,0	628,3	579,4	533,1	490,3	637,2	553,5	327,4	334,9	355,1	339,1
20/02/11	03	246,6	328,3	289,6	288,1	234,3	244,1	233,9	237,4	267,1	218,1	323,2	269,5	298,0	247,2	371,8	305,7	239,1	226,0	449,0	304,7
01/05/11	04	58,6	92,7	69,5	73,6	63,2	90,1	96,9	83,4	58,4	62,9	97,1	72,8	42,2	108,2	97,0	82,5	121,0	192,7	172,8	162,2
19/05/11	05	46,9	52,5	37,2	45,6	79,0	80,7	51,2	70,3	51,8	45,0	47,4	48,0	66,2	54,2	55,6	58,7	253,5	248,4	258,7	253,5
29/05/11	06	50,1	26,1	38,1	38,1	83,3	85,2	81,4	83,3	53,1	54,6	41,1	49,6	76,1	64,7	53,2	64,7	192,4	179,0	206,4	192,6
16/06/11	07	55,4	57,0	59,3	57,2	263,7	267,8	271,8	267,8	145,8	145,8	145,8	145,8	247,1	225,7	204,4	225,7	284,7	287,2	289,7	287,2
03/07/11	08	54,3	53,2	63,7	57,1	167,3	194,4	140,4	167,4	89,0	89,2	88,8	89,0	135,6	135,3	134,9	135,3	105,7	118,6	133,5	119,2
12/07/11	09	98,9	66,4	60,7	75,3	270,9	255,9	286,0	270,9	216,5	251,1	302,4	256,7	126,9	169,1	116,4	137,5	126,6	183,0	135,5	148,4
14/07/11	10	24,3	95,9	89,4	69,9	135,8	268,6	308,0	237,4	188,1	228,5	191,3	202,6	267,7	367,8	340,6	325,4	176,7	172,1	207,1	185,3
16/07/11	11	91,9	76,0	58,1	75,3	226,5	193,6	259,4	226,5	159,2	194,8	188,9	181,0	203,3	300,3	243,6	249,0	153,2	118,0	161,6	144,3
18/07/11	12	172,9	158,6	173,5	168,4	87,0	332,1	284,5	234,5	173,1	186,9	189,6	183,2	294,4	256,7	326,0	292,3	229,6	205,8	255,7	230,3
21/07/11	13	141,9	220,4	106,7	156,4	164,7	251,7	233,8	216,7	192,0	183,9	174,5	183,5	295,6	335,4	255,7	295,5	210,8	197,8	257,2	222,0
27/07/11	14	87,4	60,9	145,1	97,8	204,6	124,2	284,9	204,5	185,8	117,4	254,2	185,8	193,2	201,7	169,2	188,0	243,7	218,1	269,3	243,7
28/08/11	15	404,2	258,8	292,9	318,6	416,5	551,8	354,0	440,8	555,5	713,4	707,9	659,0	306,4	427,9	405,7	380,0	308,3	202,2	391,8	300,8
30/08/11	16	251,6	295,7	165,6	237,6	107,1	211,5	208,2	175,6	270,5	284,0	277,3	277,3	131,7	85,5	156,7	124,6	213,7	118,4	104,0	145,4
02/09/11	17	204,8	125,3	169,0	166,3	27,9	81,3	91,7	66,9	128,0	100,1	55,5	94,5	87,0	96,8	41,1	75,0	153,6	138,8	182,0	158,1
04/09/11	18	282,9	303,2	288,7	291,6	76,5	79,5	55,7	70,6	56,3	129,1	97,2	94,2	203,8	200,0	199,5	201,1	185,7	267,8	380,4	278,0
08/09/11	19	174,5	187,6	183,2	181,8	189,2	162,7	99,6	150,5	199,3	224,5	239,6	221,1	172,2	123,6	169,6	155,2	132,7	94,1	122,5	116,4
13/09/11	20	133,1	253,5	231,6	206,1	127,0	134,1	76,0	112,4	188,5	126,8	124,0	146,4	224,3	178,5	175,0	192,6	77,2	143,1	130,3	116,9
19/09/11	21	195,4	360,4	277,9	277,9	66,9	92,7	79,8	79,8	74,3	106,9	90,6	90,6	69,1	120,3	94,7	94,7	173,7	220,2	197,0	197,0
25/09/11	22	175,6	162,5	197,1	178,4	75,4	24,8	79,6	59,9	53,1	64,4	15,6	44,4	56,2	69,7	90,0	71,9	124,3	103,8	223,2	150,5
02/10/11	23	261,4	422,1	425,3	369,6	249,5	233,6	224,8	236,0	266,6	274,4	284,6	275,2	191,4	291,6	145,3	209,4	376,2	419,4	427,5	407,7
11/10/11	24	227,2	298,6	233,8	253,2	212,6	191,0	272,9	225,5	233,6	235,2	241,1	236,6	174,6	249,8	120,9	181,8	295,8	316,7	319,0	310,5
13/10/11	25	208,3	251,9	244,5	234,9	129,1	135,6	148,5	137,7	155,8	119,9	135,4	137,0	93,0	129,0	71,9	98,0	208,0	247,0	199,1	218,0
15/10/11	26	260,7	283,2	160,6	234,9	162,4	222,5	135,4	173,4	185,0	177,4	143,4	168,6	133,6	195,2	139,6	156,1	210,2	293,5	208,0	237,2
18/10/11	27	131,0	237,3	186,4	184,9	83,4	133,5	119,3	112,0	99,0	140,2	98,1	112,4	107,8	96,4	102,1	102,1	116,1	183,2	162,7	154,0
01/10/11	28	64,2	143,6	83,6	97,1	64,1	165,5	177,8	135,8	107,9	186,2	139,0	144,3	43,3	190,8	57,3	97,1	126,4	157,2	241,3	175,0
25/10/11	29	205,7	284,3	213,0	234,3	141,4	156,7	196,5	164,9	183,0	153,3	229,4	188,6	115,9	185,8	92,0	131,2	292,3	310,7	269,2	290,7
09/11/11	30	64,8	163,3	93,4	107,2	143,7	198,5	297,9	213,4	167,4	242,6	222,6	210,9	153,7	124,2	90,2	122,7	201,2	271,3	260,0	244,2
30/11/11	31	53,3	43,0	43,0	46,4	119,7	154,7	129,5	134,6	119,5	131,8	135,7	129,0	133,7	131,1	118,7	127,8	176,6	204,2	206,2	195,7
12/12/11	32	87,3	99,9	99,9	95,7	109,6	124,1	122,2	118,6	80,6	85,4	102,7	89,6	35,2	120,6	104,2	86,7	60,2	162,5	150,6	124,4

Apêndice 5



Foto 1. Vista da trincheira escavada até 30 cm de profundidade.



Foto 2. Processo de escavação até 100 cm de profundidade.



Foto 3. Dia de coleta dos GEE.



Foto 4. Visão geral do experimento.

